

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT : GENIE MECANIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Option : Modélisation et simulation en mécanique

Thème

*Etude et réalisation d'une machine outil à commande
numérique (fraiseuse 3 axes).*

Réalisé par :

Mr. MAHDJOURI Abdelfettah

Promotrice :

Melle. GUERRACHE Fadila

Co promoteur :

Mr. KARI Djamaledine

Devant le jury :

Mr. BOUDIEB D. (Président)

Mr. BELAL A. (Examineur)

Mr. CHALA Moussa (Examineur)

Année universitaire : 2016/2017

ملخص

في مجال الصناعة الميكانيكية، من جهة تصميم المنتج طبقا لدفتر شروط العميل يتطلب فترة طويلة و يؤثر على التكلفة. من جهة أخرى استخراج برامج التحكم الرقمي المستخدمة في التصنيع تتطلب كفاءة عالية، لهذا من الضروري استخدام أنظمة دعم الكمبيوتر المتخصصة في التصميم و التصنيع بمساعدة الإيلام الآلي.

من خلال هذا العمل قمنا بإعطاء بعض الأساسيات على آلات التصنيع باستخدام الحاسب الآلي وتصنيفها وكذا طرق التحكم الأكثر تداولاً.

ثم قمنا بنظرة عامة على التصميم و التصنيع بمساعدة الحاسوب بالإضافة إلى تقديم تعريف حول برنامج السوليدوركس.

وأخيراً تحليل لتصنيع الأجزاء المختلفة التي تشكل هذه الآلة من ثم تحديد عمليات التصنيع.

الكلمات المفتاحية : أنظمة، المحرك الخطوي، CN، DAO، CAO، CFAO.

Résumé

Dans l'industrie mécanique, d'un côté la conception des produits à partir du cahier de charge du client requiert une longue durée et influe sur le coût du produit. De l'autre côté la génération des programmes CN pour la fabrication du produit exige une compétence très élevée. Pour cela il est nécessaire d'utiliser des systèmes d'aide informatiques spécialisés pour la conception et la fabrication assistées par ordinateur (CFAO).

Dans notre travail, nous avons essayé de donner quelques notions fondamentales sur les machines à commande numérique et leur classification, les commandes les plus utilisées.

Ensuite une partie CAO/FAO a été présentée et un aperçu général sur la conception et la fabrication assisté par ordinateur et leur évolution suivi par une présentation du logiciel Solidworks ainsi que les différentes étapes pour la conception du notre machine outil à commande numérique (fraiseuse 3 axes).

Enfin une étude de fabrication des différentes pièces qui composent cette machine a été faite afin de déterminer les processus d'usinage.

Mots clés : Systèmes CFAO, CAO, FAO, Programmation CNC, Code-G, Moteurs pas à pas, Arduino Mega 2560.

Abstract

In mechanical industry, on the one hand the product design from the specifications of the customer requires a long-term and affects the cost of the product. On the other hand the generation of programs CN for the manufacture of the product requires a very high skill. For this it is necessary to use support systems computer specialist for design and manufacturing (CAD/CAM) computer-assisted.

In our work, we have tried to give some basics on the CNC machines and their classification, the most used commands.

Then a CAD/CAM part was presented and a general overview on the design and computer-aided manufacturing and their evolution, followed by a presentation of the software Solid works and the various steps for the design of our machine tool CNC (mill 3 axes).

Finally a study of different parts that make up this machine was made in order to determine the machining process.

Keywords: systems CAD/CAM, CAD, cam, CNC programming, G Code, stepper motors, Arduino Mega 2560.

Remerciement

Nulle œuvre n'est exaltante que celle réalisée avec le soutien moral et financier des personnes qui nous sont proches.

Je tiens à exprimer ma plus profonde reconnaissance à :

- + DIEU, pour m'avoir donné la force dans les moments difficiles d'éditer ce mémoire.*
- + Mes parents qui m'ont toujours entouré et motivé à sans cesse devenir meilleur ;*
- + Mes frères et sœurs qui m'ont assisté dans ces moments difficiles et m'ont servi d'exemple ;*
- + Professeur MOHAMEDI, responsable de filière et tous le membre de groupe MESO ;*
- + Ma promotrice Mlle GUERRACHE pour son aide et sa précieuse attention ;*
- + Mr KARI, mon guide dans ce travail concernant le coté pratique ;*
- + Tous mes professeurs sans exception de la phase primaire jusqu'à ce que je suis aujourd'hui pour leurs disponibilité et conseils ;*
- + Mes collègues qui n'ont cessé de m'encourager ;*

Trouvez ici l'expression de ma profonde gratitude et reconnaissance.

MAHDJOUBI Abdelkettah

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieuses conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Quisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mes frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Mes professeurs qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

Abréviations

CFAO : Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur.

CAO : Conception Assistée par Ordinateur.

FAO : Fabrication Assistée par Ordinateur.

CN : Commande Numérique.

MOCN : Machine Outils à Commande Numérique.

CNC : Commande Numérique par calculateur.

DAO : Dessin Assistée par Ordinateur.

DFN : Fichier de définition numérique.

MIT: Massachusetts Institute of Technology.

DNC: Direct numerical control.

Vc : Vitesse de coupe.

CIM : Computer integrated manufacturing.

Table des matières

Résumé

Remerciement

Dédicace

Abréviation

Liste des figures & Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I. La technologie de la commande numérique.

I.1. Introduction..... 3

I.2. Généralités 4

I.3. Historique 4

I.4. Etat de l'art de machine-outil à commande numérique 5

I.5. Justification de la CN..... 7

I.5.1. Automaticité..... 7

I.5.2. Flexibilité 8

I.5.3. Sécurité..... 9

I.5.4. Nécessités économiques et techniques..... 9

I.6. Comparaison entre MO conventionnelles et MOCN..... 9

I.7. Domaine d'utilisation de MOCN..... 12

I.8. Avantages et inconvénients liés aux MOCN 13

I.9. Architecture et organisation générale d'une MOCN 13

I.9.1. Schéma simple d'une machine à commande numérique 14

I.9.2. Eléments constitutifs de la partie commande et de la partie opérative 15

I.9.2.1. La partie opérative 15

I.9.2.2. La partie commande.....	17
I.9.3. Repérage des axes de MOCN	17
I.9.4. Asservissement d'un axe d'une MOCN.....	19
I.9.4.1. Système à boucle ouverte	20
I.9.4.2. Système à boucle fermée	20
I.10. Classification des MOCN	20
I.10.1. Classification des MOCN selon le mode de fonctionnement	21
I.10.1.1. Fonctionnement en boucle ouvert	21
I.10.1.2. Fonctionnement avec commande adaptative	22
I.10.1.3. Fonctionnement en boucle fermé	23
I.10.2. Classification des MOCN selon le nombre d'axe	23
I.10.3. Classification des MOCN selon le mode d'usinage.....	25
I.10.3.1. Commande numérique point à point	25
I.10.3.2. Commande numérique paraxiale	26
I.10.3.3. Commande numérique de contournage	26
I.11. Conclusion	27

Chapitre II. La méthodologie de programmation manuelle.

II.1. Introduction	28
II.2. Généralités.....	28
II.3. Principe et méthodologie de programmation manuelle	29
II.3.1. Préparer le dessin de la pièce.....	29
II.3.2. Définir le déroulement des opérations d'usinage.....	29
II.3.3. Définir la gamme de fabrication.....	29

II.3.4.	Traduire les opérations dans le langage de programmation	30
II.3.5.	Regrouper toutes les opérations en un programme	30
II.4.	Constitution et normalisation des codes en programmation manuelle.....	30
II.4.1.	Format d'un mot	30
II.4.2.	Format de bloc	33
II.4.3.	Structure générale d'un programme	33
II.4.3.1.	Structure d'un programme ISO	33
II.5.	Programmation ISO	34
II.5.1.	Mode de programmation	34
II.5.2.	Interpolation linéaire.....	36
II.5.3.	Interpolation circulaire	37
II.5.4.	Choix du plan d'interpolation (fraisage)	38
II.5.5.	Commande de la broche	39
II.5.5.1.	Rotation	39
II.5.5.2.	vitesse	40
II.5.6.	Mode d'avance	41
II.5.7.	Programmation des outils	42
II.5.7.1.	Appel d'outil et des correcteurs d'outil en tournage [FANUC]	42
II.5.7.2.	Appel d'outil et des correcteurs d'outil en fraisage [SINUMERIK-SIEMENS 840D]	43
II.5.8.	Correcteur d'outils G41-G42.....	43
II.5.9.	Condition d'enchaînement des trajectoires.....	46
II.6.	Qualité et rôle du programmeur humain dans les systèmes à commande numérique	48
II.7.	Conclusion.....	49

Chapitre III. Conception et réalisation d'une fraiseuse 3 axes.

III.1. Introduction	50
III.2. Caractéristiques techniques de sélection des MOCN	50
III.2.1. Aspect de la machine	50
III.2.1.1. Bâti et structure	50
III.2.1.2. Glissières.....	50
III.2.1.3. Les vis-mères	51
III.2.1.4. Organes de transmission	51
III.2.1.5. Les moteurs	51
III.2.2. Sur le système de mesure	52
III.2.2.1. Système de mesure	52
III.2.2.2. Les systèmes de mesure incrémentaux, analogiques et semi-absolues.....	52
III.2.3. Sur les caractéristiques des systèmes de commande.....	53
III.2.3.1. Entrée et sortie des données	53
III.2.3.2. Fonctions auxiliaires	54
III.2.3.3. Cycles fixes	55
III.2.3.4. Programme paramétrique	55
III.2.3.5. Programmation	55
III.2.4. Sur l'entretien	56
III.3. Description de MOCN	56
III.3.1. Conception assistée par ordinateur (CAO)	56
III.3.1.1. SOLIDWORKS	56
III.3.1.2. Pourquoi s'abonner ?	57
III.3.2. Conception de la machine	57

III.3.2.1. Moteur pas à pas	57
III.3.2.2. Palier	58
III.3.2.3. Accouplement	59
III.3.2.4. Vise à bille	60
III.3.2.5. Glissière	61
III.3.2.6. Rail	61
III.3.2.7. Axe d'une CNC	62
III.4. Paramètres fondamentales d'adaptation d'une commande numérique	63
III.4.1. Paramètres relatifs à la pièce.....	63
III.4.2. Aspect économique.....	64
III.5. Organisation de la méthodologie d'introduction de commande numérique	67
III.5.1. Qu'est-ce qu'Arduino?.....	67
III.5.1.1. Qu'est-ce qu'un microcontrôleur ?	68
III.5.2. Les différentes versions d'Arduino.....	71
III.5.3. Pourquoi Arduino ?.....	73
III.5.4. Programmation / initialisation de l'interface	74
III.5.4.1. Arduino	74
III.5.4.2. Universal G-code sender GRBL	77
III.6. Influence de l'introduction de la CN sur l'entreprise	77
III.6.1. Aspect technique	77
III.6.1.1. Bureau d'études	77
III.6.1.2. Bureau des méthodes	77
III.6.1.3. Sur la fabrication	78
III.6.2. Aspect social	79
III.6.3. Aspect économique	79

III.6.3.1. Réduction des temps de lancement	79
III.6.3.2. Réduction des temps de fabrication	79
III.6.3.3. Réduction des temps de manipulation	79
III.6.3.4. Réduction des rebuts	80
III.6.3.5. Diminution de temps de contrôle	80
III.6.3.6. Diminution des en-cours	80
III.6.3.7. Diminution du travail d'assemblage	81
III.6.3.8. Facilité de modification de dessin	81
III.7. Conclusion	81

Chapitre IV. Dimensionnement des organes de la machine.

IV.1. Cahier des charges	82
IV.2. Dimensionnement de la broche.....	82
IV.2.1. Effort de coupe	82
IV.2.2. Moment de coupe	84
IV.2.3. Puissance de coupe.....	84
IV.2.4. Puissance du moteur.....	85
IV.2.5. Vérification des calculs graphiquement	85
IV.3. Dimensionnement de la vis.....	86
IV.3.1. Calcul de la résistance au déplacement F_m	86
IV.3.2. Calcul du couple au démarrage (couple minimal de transmission C_{min})	86
IV.3.3. Couple de charge C_c	87
IV.3.4. Diamètre de la vis.....	88
IV.3.5. La charge axiale admissible	91
IV.3.6. Charge critique d'Euler F_c	94

IV.3.7. Calcule de la charge axiale de fonctionnement admissible et de la vitesse Graphiquement	94
IV.3.8. Vitesse critique	97
IV.3.9. Vitesse de fonctionnement admissible	97
IV.4. Calcule de roulement	99
IV.4.1. Définition	99
IV.4.2. Constitution d'un roulement.....	99
IV.4.3. Type de roulement.....	99
IV.4.4. Emplacement des roulements.....	100
IV.4.5. Caractéristiques du roulement	101
Caractéristiques du roulement SKF N° W 6006-2RS1.....	102
IV.4.6. Charge dynamique équivalente	102
IV.4.7. Durée de vie nominale.....	103
IV.4.8. Le coefficient de sécurité statique s_0	103
Conclusion.....	105

Chapitre V. Réalisation et test de la machine.

Introduction	106
V.1. Caractéristiques de la machine	106
V.1.1. Bâti.....	106
V.1.2. Espace de travail	106
V.1.3. Caractéristiques de la broche	107
V.1.4. Les axes X, Y	107
V.1.5. la glissière	108
V.2. Test d'un simple usinage.....	109

<i>Conclusion générale</i>	110
Références bibliographiques	111
<i>Annexes</i>	113

Liste des figures

Figure I.1. Première MOCN en 1952.....	6
Figure I.2. Productivité comparée de diverses machines en fonction de leur degré d'automatisation.	10
Figure I.3. Structure d'une machine à commande numérique.	14
Figure I.4. Architecture d'une machine à commande numérique.	14
Figure I.5. Éléments de la partie opérative.	16
Figure I.6. Fonction originale d'une commande numérique.	17
Figure I.7. Capteurs absolus et capteurs relatifs.	18
Figure I.8. Système vis-écrou à bille.....	18
Figure I.9. Structure d'un axe de la MOCN.	19
Figure I.10. Fonctionnement en boucle ouverte.....	20
Figure I.11. Fonctionnement en boucle fermée.	20
Figure I.12. Fonctionnement en boucle ouvert.	21
Figure I.13. Commande adaptative.	22
Figure I.14. Commande en boucle fermée.	23
Figure I.15. Axes Primaires Et Axes Additionnels.	24
Figure I.16. Axes fraiseuse et tour.	24
Figure I.17. Axes en centre de fraiseuse.	25
Figure I.18. Commande Numérique point à point.	25
Figure I.19. Commande paraxiale.....	26
Figure I.20. Commande numérique de contournage.....	26
Figure II.1. Méthodes comparées de programmation.	28
Figure II.2. Structure et contenu d'un programme CN.	30

Figure II.3. Format d'un mot.	31
Figure II.4. Bloc de chiffres.	31
Figure II.5. Format de bloc.	33
Figure II.6. Structure d'un programme ISO.	34
Figure II.7. Mode de programmation.	35
Figure II.8. Les fonction de programmation de G0 et G1.	36
Figure II.9. Interpolation circulaire.	37
Figure II.10. Les fonctions de programmation de G02 et G03.	38
Figure II.11. Choix du plan d'interpolation (fraisage).	38
Figure II.12. Rotation de la broche.	39
Figure II.13. Vitesse de la broche.	40
Figure II.14. Mode d'avance.	41
Figure II.15. Correcteur d'outils G41-G42.	44
Figure II.16. Exemple de programmation avec correction de trajectoire de rayon d'outil.	44
Figure II.17. Condition d'enchaînement des trajectoires en tournage.	46
Figure II.18. Condition d'enchaînement des trajectoires en Fraisage.	47
Figure III.1. Moteur pas à pas.	60
Figure III.2. Palier.	61
Figure III.3. Accouplement.	61
Figure III.4. Visse à bille.	63
Figure III.5. Glissière.	63
Figure III.6. Rail.	64
Figure III.7. Axe d'une CNC.	66
Figure III.8. Fraiseuse 3 axes (MOCN).	66
Figure III.9. Schéma simplifié du contenu type d'un microcontrôleur.	71

Figure III.10. Carte arduino Mega2560.	75
Figure III.11. Carte arduino Uno.	75
Figure III.12. L'interface d'Arduino.	77
Figure III.13. SHELL_MEGA24.	78
Figure III.14. La sélection de type de carte.	78
Figure III.15. La sélection de type de port.	79
Figure III.16. La carte est prête.	79
Figure III.17. L'interface de logiciel Universal G-code sender.	80
Figure IV.1. Facteur de correction f_h en fonction de h_m	84
Figure IV.2. Abaque pour calcul de puissance de la broche et du moteur.	85
Figure IV.3. Les différents diamètres pour une vis à billes.	89
Figure IV.4. Arbre épaulé soumise à un moment de flexion.	90
Figure IV.5. Le facteur de concentration de contrainte dans le cas d'un arbre épaulé en flexion.	91
Figure IV.6. vis à bille soumise à une charge axiale de compression.	91
Figure IV.7. Différents configuration pour le calcul de la longueur libre.	93
Figure IV.8. Montage type fixe-fixe.	94
Figure IV.9. Montage type fixe-supporté.	95
Figure IV.10. Montage type fixe-libre.	95
Figure IV.11. Montage type supporté-supporté.	95
Figure IV.12. Charge de fonctionnement admissible de la vis en fonction du type de montage et du diamètre.	96
Figure IV.13. Vitesse critique de rotation de la vis en fonction du type de montage et du diamètre.	98
Figure IV.14. Constitution d'un roulement.	99
Figure IV.15. Dessin présente l'emplacement des roulements.	101

Figure V.1. Le bâti.	106
Figure V.2. La broche.....	107
Figure V.3. Les axes X, Y.....	107
Figure V.4. La glissière.	108
Figure V.5. L'armoire de commande.....	108
Figure V.6. Simulation d'usinage avec WinUnisoft.	109
Figure V.7. Résultat d'usinage.	109

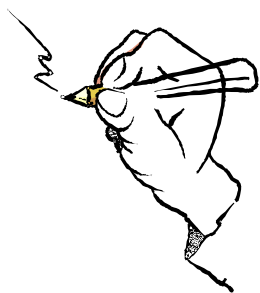
Liste des tableaux

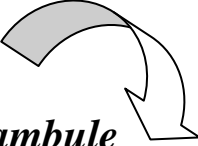
Tableau I.1. Les différentes étapes de développement de la CN.	6
Tableau I.2. Quelques différences entre MO et MOCN.	11
Tableau I.3. Avantages et inconvénients des MOCN.	13
Tableau I.4. Axe des différents mouvements possibles.	23
Tableau II.1. Symbole d'adresse.	31
Tableau II.2. Mode de programmation d'un tournage.	35
Tableau II.3. Mode de programmation d'un fraisage.	36
Tableau II.4. feuille de programme.	45
Tableau III.1. Les critères de choix sur les glissières.	50
Tableau III.2. Les critères de choix sur les vis.	51
Tableau III.3. Les critères de choix sur les moteurs.	51
Tableau III.4. Les systèmes de mesure.	52
Tableau III.5. Les systèmes de mesures (incrémentaux, analogiques, semi-absolues).	52
Tableau III.6. Entrée et sortie des données.	53
Tableau III.7. Fonction auxiliaires.	54
Tableau III.8. Type de programmation.	55
Tableau III.9. Pièces justifiant le passage en commande numérique.	63
Tableau III.10. points d'amélioration et l'économie à atteindre.	64
Tableau III.11. Comparatif entre Arduino Uno et Mega2560.	73
Tableau III.12. % de réduction des temps de manipulation.	79
Tableau III.13. % de Diminution de temps de contrôle.	80
Tableau III.14. % de réduction des en-cours.	81

Tableau IV.1. Efforts spécifique de coupe en fonction du matériau usiné.....	83
Tableau IV.2. Epaisseur moyenne du copeau en fonction du rapport ar/D.	83
Tableau IV.3. La résistance au joint en fonction du type des glissières.	86
Tableau IV.4. Table des diamètres normalisés pour vis à bille.	90
Tableau IV.5. La charge admissible selon la valeur de l'élancement.	93
Tableau IV.6. Coefficient de correction en fonction du type de montage.	97
Tableau IV.7. Caractéristiques du roulement SKF N° W 6006-2RS1.....	102
Tableau IV.8. Coefficients de calcul pour roulements rigides à une ou deux rangées de billes.	102
Tableau IV.9. Coefficients e, X, Y, X0, et Y0.....	104
Tableau IV.10. valeur du coefficient de sécurité d'après le catalogue SKF.....	105

Introduction générale.....01-02

Page





Préambule

L'usinage ou l'obtention de pièces mécaniques sous contrôle mécanique s'étend désormais à l'ensemble des secteurs de l'industrie. Réservée, il y'a pas si longtemps, à certaines industries de pointe, les machines-outils à commande numérique sont maintenant utilisées dans toutes les usines de fabrications mécaniques et sont accessibles aux petites et moyennes entreprises, alors qu'elles ont été longtemps réservées a l'outillage et à la fabrication de petites séries. On se rend compte maintenant qu'elles conviennent très bien aux grandes séries et qu'elles constituent le plus souvent, la base des ateliers flexibles.

Elles sont actuellement reconnues par tous les utilisateurs par leurs rentabilités qui ne sont plus à prouver. Elles permettent d'obtenir des pièces d'excellentes qualités tout en améliorant sensiblement la productivité.

La connaissance de ces machines aux technologies récentes ainsi que la manière de les utiliser sont devenues nécessaires dans l'industrie en générale, et peuvent nous aider, nous cadres techniques d'acquérir le maximum de cette nouvelle technologie pour pouvoir un donner un nouvel élan à l'industrie Algérienne.



Problématique

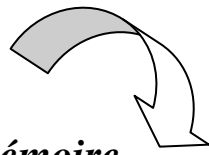
Etude et réalisation d'une machine outil à commande numérique demande beaucoup de temps et un investissement énorme. L'adapter à un processus technologique de production c'est encore plus difficile.

Voilà pourquoi exploiter une MOCN est dédiée à des fabrications variées de pièces différentes lancées en petits lots répétitifs.

La machine outil et son évolution actuelle, elle représente encore le moyen de production le plus important des pièces mécaniques. De part l'avancée des techniques, la machine outil a subit des modifications, et le couple outil machine-outil s'est adapté aux

Introduction générale

exigences de productivité modernes. Une MOCN est une machine d'usinage à cycle automatique programmable.



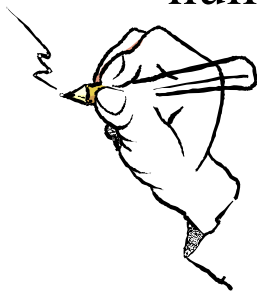
Description du mémoire

Ce mémoire est structuré en une introduction générale ainsi que cinq chapitres et des références bibliographiques. La technologie de la commande numérique et généralités sur les MOCN ont été résumés le premier chapitre. La méthodologie de programmation manuelle dans le deuxième chapitre. Le troisième chapitre, représente le noyau du mémoire, la conception et la réalisation d'une MOCN, ainsi qu'une présentation de système commande basé sur l'Arduino et GRBL. Le quatrième chapitre consiste le dimensionnement, test et réalisation dans le dernier chapitre.

Finalement, se terminons ce mémoire par une conclusion générale et une annexe.

Chapitre I. La technologie de la commande
numérique.....**03-27**

Page



Introduction

Par extension, on appelle « commande numérique » l'armoire de commande recevant le programme d'usinage sous forme d'un ruban perforé (systèmes des années 1950 à 1980), d'une bande magnétique (systèmes des années 1970 à 1985), ou de données issues d'un ordinateur.

On désigne parfois ainsi la machine complète équipée d'un tel dispositif. On parle d'un tour à commande numérique, ou d'une fraiseuse à commande numérique, par opposition à un tour conventionnel ou une fraiseuse conventionnelle, dont les mouvements sont commandés manuellement ou par un dispositif automatisé d'une façon figée.

Les machines-outils spécialisées (aléseuses-perceuses, fraiseuses) à commande numérique ont évolué en centres d'usinage à commande numérique permettant d'usiner des formes complexes sans démontage de la pièce. Ces centres d'usinage sont généralement équipés de magasins d'outils (touvelles, tables, chaînes) sur lesquels sont disposés les différents outils. Les changements d'outils équipant la (ou les) tête(s) d'usinage sont programmés en fonction de la définition numérique de la pièce.

Le fichier de définition numérique (qu'on appelle aussi DFN, définition numérique, numérisation ou même tout simplement num) est un fichier informatique généré par CAO (Conception Assistée par Ordinateur), qui remplace de plus en plus le plan sur la traditionnelle planche à dessin. CATIA V5 et SOLIDWORKS sont actuellement parmi les logiciels de CAO, les plus utilisés pour établir les DFN dans les domaines de l'automobile et de l'aéronautique.

Sur ces définitions doivent ensuite être calculés des parcours d'outil au moyen de logiciels de FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur). Ces parcours sont alors traduits par un logiciel dit post-processeur (généralement adossé au logiciel de FAO) dans un langage compréhensible par la « commande numérique » et appelé : langage de programmation. On parle de programmation de commande numérique. En usinage, ce langage de programmation obéit, pour une part, à la norme ISO 6983 (RS274D, 1980). Il existe cependant d'autres standardisations plus récentes (par exemple STEP-NC).

I.1. Généralités

La commande numérique (CN) est une technique utilisant des données composées de codes alphanumériques pour représenter les instructions géométriques et technologiques nécessaires à la conduite d'une machine ou d'un procédé.

C'est également une méthode d'automatisation des fonctions des machines ayant pour caractéristique principale une très grande facilité d'adaptation à des travaux différents. À ce titre, la commande numérique constitue l'un des meilleurs exemples de pénétration du traitement de l'information dans les activités de production.

Exploitant au maximum les possibilités de la micro-informatique, toutes les données sont traitées en temps réel, c'est-à-dire au moment où elles sont générées, de manière à ce que les résultats du traitement contribuent également à piloter le processus.

Après une première génération de commandes numériques à logique câblée sont apparues les commandes numériques par calculateur (CNC), ou par ordinateur, qui intègrent un ou plusieurs ordinateurs spécifiques pour réaliser tout ou partie des fonctions de commande.

Tous les systèmes de commande numérique commercialisés actuellement contenant au moins un microprocesseur, les termes CN et CNC peuvent être considérés comme des synonymes. [1]

I.2. Historique

2000 ans avant Jésus Christ, la plus ancienne machine-outil jamais découverte est un tour. A l'âge du bronze, les artisans se servaient de tours à arc. Plus tard, le tour de potier sera découvert. Vers l'an 1500, Léonard de Vinci propose des solutions basées sur du tournage à mouvement continu. Son tour, comme beaucoup de ses inventions, est en avance sur son époque.

Il faudra attendre le XIX^{ème} siècle pour que les bases de la mécanique moderne poursuivent cette évolution et débouchent sur le tour automatique.

Historiquement les premières machines ont donc été des tours pour la fabrication de pièces de révolution. Les tours actuels sont toujours basés sur le même principe.

Par contre, parmi les autres machines présentées dans cette encyclopédie, certaines ont évolué et d'autres ont disparu. Par exemple, les machines à raboter et les limeuses (rebaptisées ultérieurement étaux limeurs) ont quitté les ateliers, remplacées par les fraiseuses.

A la fin des années 70, l'apparition des premières commandes numériques a révolutionné le monde de la machine-outil. Les types de machines (tours - fraiseuses) n'ont pas fondamentalement changé, mais les temps de reconfiguration de ces machines ont été considérablement réduits par le remplacement des butées réglables (mécaniques ou électromécaniques) par des butées logicielles.

L'utilisation des commandes numériques a également permis d'augmenter la complexité des formes réalisées grâce à la combinaison de mouvements suivant plusieurs axes. Nous allons maintenant présenter quelques machines courantes et les surfaces qu'elles permettent de générer. [2]

I.3. Etat de l'art de machine-outil à commande numérique

Les travaux menés par Falcon et Jacquard à la fin du XVIIIe siècle ont montré qu'il était possible de commander les mouvements d'une machine à partir d'informations transmises par un carton perforé. Leur métier à tisser de 1805 fut le premier équipement à être doté de cette technique et, de ce point de vue, il peut être considéré comme l'ancêtre de la commande numérique.

Il faut cependant rattacher l'exploitation industrielle de la CN au développement de l'électronique.

En 1947, à Traverse City dans l'État du Michigan, John Parsons fabrique pour le compte de l'US Air Force des pales d'hélicoptère par reproduction. Pour façonner ses gabarits, il utilise une méthode consistant à percer plusieurs centaines de trous faiblement espacés de manière à approcher le profil théorique. L'emplacement et la profondeur de chaque trou sont calculés avec précision par un ordinateur IBM à cartes perforées. La finition de la surface est obtenue par des opérations manuelles de polissage.

Mais, lorsque l'US Air Force confie à ce même Parsons la réalisation de pièces de formes encore plus complexes pour ses futurs avions supersoniques, celui-ci réalise que sa méthode est trop approximative et que seul un usinage continu en 3 dimensions sera en mesure de donner satisfaction.

Au printemps 1949, il confie alors au Massachusetts Institute of Technology (MIT) le soin de développer des asservissements capables de piloter une machine qui recevra des instructions intermittentes à partir d'un lecteur de cartes.

Cette machine, une fraiseuse prototype Cincinnati à broche verticale, conçue pour exécuter des déplacements simultanés suivant 3 axes, est officiellement présentée en septembre 1952 dans le Servomechanisms Laboratory du MIT. L'information mathématique étant la base du concept, on lui donne le nom de numerical control.

Il faut encore attendre quelques années de vastes fonds de l'US Air Force et l'appui des chercheurs du MIT pour rendre la première Machine-outil à commande numérique (MOCN) réellement opérationnelle. [1]

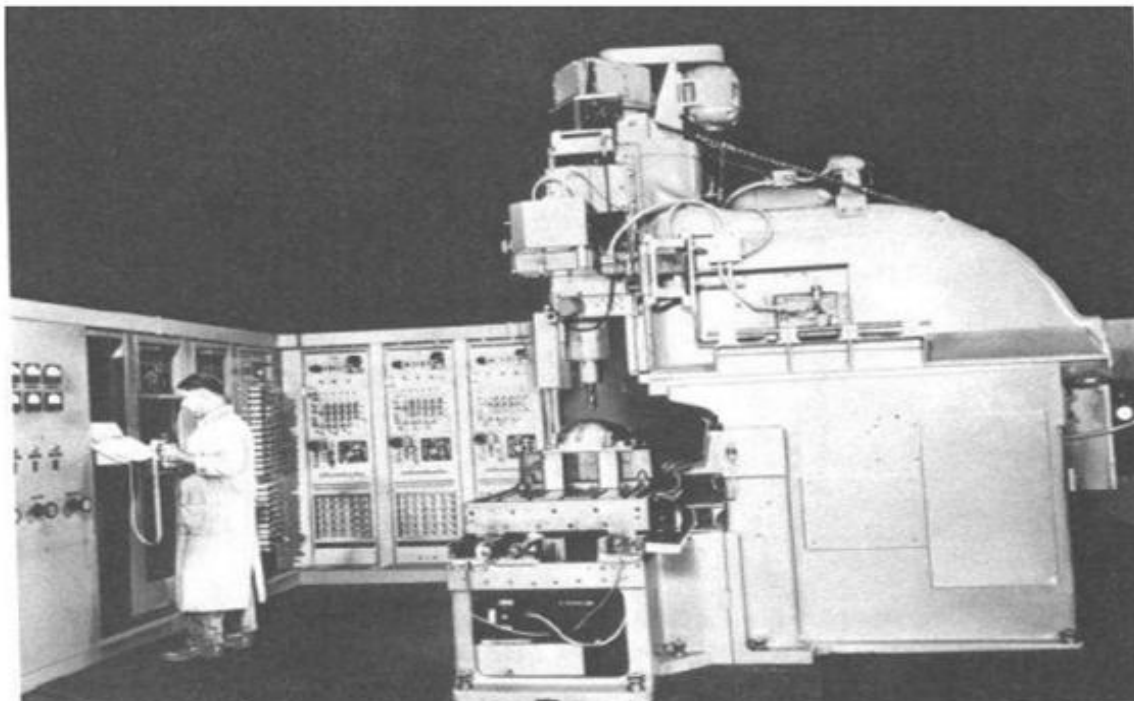


Figure I.1. Première MOCN en 1952.

Tableau I.1. Les différentes étapes de développement de la CN. [1]

Année	Les différentes étapes de développement de la CN.
1954	Bendix acquiert le brevet de Parsons et fabrique la première CN industrielle.
1955	à Font du Lac (Wisconsin), le constructeur américain Giddins & Lewis commercialise la première MOCN.

1959	apparition de la CN en Europe (foire de Hanovre). Le MIT annonce la création du langage de programmation APT (Automatic Programed Tools).
1960	apparition du système DNC (Direct Numerical Control).
1964	en France, la Télémécanique Electrique lance la CN NUM 100 conçue à base de relais Téléstatic.
1968	la CN adopte les circuits intégrés ; elle devient plus compacte et plus puissante. Le premier centre d'usinage est mis en vente par Kearney & Trecker (USA).
1972	les minicalculateurs remplacent les logiques câblées ; la CN devient CNC.
1976	développement des CN à microprocesseurs.
1984	apparition de fonctions graphiques évoluées et du mode de programmation conversationnel, début de l'ère de la fabrication assistée par ordinateur (FAO).
1986	les CN s'intègrent dans les réseaux de communication, début de l'ère de la fabrication flexible (CIM : computer integrated manufacturing).
1990	développement des CN à microprocesseurs 32 bits.

I.4. Justification de la CN

I.4.1. Automaticité

Le premier avantage d'une CN est d'offrir aux machines qui en sont équipées un très haut niveau d'automaticité. Sur de telles machines, l'intervention de l'opérateur nécessaire pour assurer la production de pièces peut être considérablement réduite voire supprimée.

De nombreuses MOCN peuvent ainsi fonctionner sans aucune assistance pendant toute la durée de leur cycle d'usinage, laissant l'opérateur libre d'accomplir d'autres tâches en dehors du poste de travail. Cette caractéristique présente un certain nombre d'avantages importants, tels que

- ✓ Une diminution notable de la fatigue de l'opérateur.
- ✓ Moins d'erreurs d'origine humaine.
- ✓ Un temps d'usinage constant et prévisible pour chaque pièce d'une même série. [5] [6]

I.4.2. Flexibilité

Puisqu'elles sont pilotées à partir d'un programme, les MOCN peuvent usiner des pièces différentes aussi facilement que l'on charge un nouveau programme. Une fois vérifié puis exécuté pour la première série, ce programme peut être facilement rappelé lorsque la même série se représente.

Une MOCN se caractérise en outre par des temps de réglage très courts qui répondent parfaitement aux impératifs de la production en flux tendus.

La grande souplesse d'utilisation de la CN entraîne une quantité non négligeable d'autres avantages :

- ✓ Changement aisé du programme d'usinage des pièces ;
- ✓ Réduction des en-cours de fabrication ;
- ✓ Réduction des outillages et suppression des gabarits ;
- ✓ Diminution du nombre des outils spéciaux et des outils de forme ;
- ✓ Réduction des temps de préparation et de réglage du poste de travail (la plupart des réglages, en particulier des outils, étant effectués hors machine) ;
- ✓ Prise en compte rapide des modifications d'usinage (il est plus facile de modifier une ligne de programme qu'un outillage spécial ou un gabarit);
- ✓ Définition plus rapide et plus fiable des conditions optimales d'usinage ;
- ✓ Réduction du nombre de prises de pièces du fait de l'universalité de la machine ;
- ✓ Diminution du temps d'attente entre les diverses machines d'usinage d'un atelier ;
- ✓ Gain sur les surfaces au sol occupées dans l'atelier ;
- ✓ Possibilité de réaliser des pièces complexes en gérant des déplacements simultanés sur plusieurs axes;
- ✓ Contrôle automatique des outils et des dimensions de pièces avec prise en compte par la CN des corrections à effectuer.
- ✓ Prise en compte rapide des modifications d'usinage (il est plus facile de modifier une ligne de programme qu'un outillage spécial ou un gabarit) ;
- ✓ Définition plus rapide et plus fiable des conditions optimales d'usinage ;
- ✓ Réduction du nombre de prises de pièces du fait de l'universalité de la machine ;
- ✓ Diminution du temps d'attente entre les diverses machines d'usinage d'un atelier ;
- ✓ Gain sur les surfaces au sol occupées dans l'atelier ;
- ✓ Possibilité de réaliser des pièces complexes en gérant des déplacements simultanés sur plusieurs axes;

- ✓ Contrôle automatique des outils et des dimensions de pièces avec prise en compte par la CN des corrections à effectuer. [5] [6]

I.4.3. Sécurité

La CN a beaucoup contribué à améliorer la sécurité des machines :

- ✓ En premier lieu, parce qu'elle connaît très précisément l'enveloppe de travail dans laquelle doivent évoluer les outils (possibilité de mémorisation des courses maximales des organes mobiles) ;
- ✓ Ensuite, parce qu'elle permet une simulation graphique hors usinage des programmes nouvellement créés pour vérification et détection des risques éventuels de collision ;
- ✓ Enfin, parce qu'en exerçant une surveillance permanente de l'usinage en cours, elle peut décider d'en interrompre le déroulement et d'alerter l'opérateur en cas d'incident.

Les constructeurs prévoient des dispositifs de protection très élaborés (contre les projections de copeaux ou de liquide d'arrosage, notamment) qui ne s'imposent pas nécessairement sur une MO conventionnelle. [5] [6]

I.4.4. Nécessités économiques et techniques

Symbole de précision, de répétabilité, de fiabilité et de flexibilité, qualités primordiales dans une économie de marché où les produits se caractérisent en termes de prix, de qualité et de délai de mise à disposition, la CN se montre économiquement intéressante pour produire à l'unité ou en série toutes les sortes de pièces, même les plus simples.

Une fois vérifié et validé, un programme assure la réalisation de 2, 10 ou 1 000 pièces identiques avec la même régularité de précision et la même qualité d'usinage, sans que l'habileté de l'opérateur n'intervienne. Il convient, en outre, de souligner que la CN ouvre de nouvelles perspectives en permettant la définition de pièces complexes qu'il est pratiquement impossible de concevoir et de fabriquer sur des MO conventionnelles. [5] [6]

I.5. Comparaison entre MO conventionnelles et MOCN

Si l'on compare une MO conventionnelle et une MOCN, on peut considérer que le temps copeau est assez voisin sur les deux types de machines. En revanche, la productivité comparée de diverses catégories de machines de niveaux d'automatisation différents, c'est-à-dire ce même temps copeau ramené au temps effectif de production, est très différent compte

tenu de la réduction importante des temps non productifs que l'on enregistre sur les machines à fort taux d'automatisation (voir **Figure I.2.**). [5]

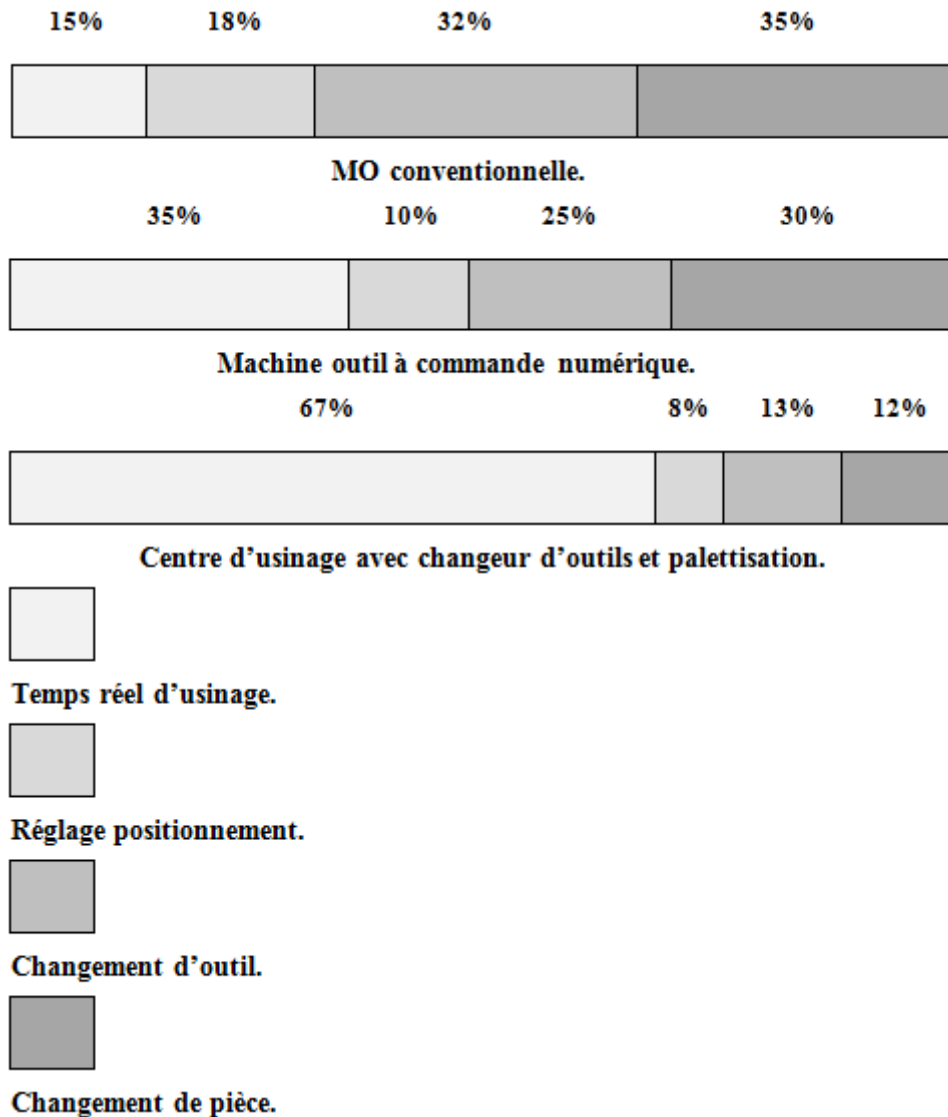


Figure I.2. Productivité comparée de diverses machines en fonction de leur degré d'automatisation.

Les fonctions remplies sont les mêmes que pour une machine conventionnelle :

- ✓ Positionner et maintenir la pièce ;
- ✓ Positionner et maintenir l'outil ;
- ✓ Assurer un mouvement relatif entre la pièce et l'outil ;

La qualité mécanique générale de ces machines est beaucoup supérieure aux MO conventionnelles :

- ✓ Motorisation plus puissante,

- ✓ Chaîne cinématique plus simple et plus robuste à variation continue capable d'encaisser des accélérations et décélérations importantes ;
- ✓ Commande des chariots par vis à bille avec système automatique de rattrapage du jeu,
- ✓ Glissière sans frottement, utilisation de glissières à galets, à billes, hydrostatiques, aérostatiques, les garnitures sont rapportées ;
- ✓ Bâtis largement dimensionnés, très rigides avec un excellent amortissement.

Les principales caractéristiques des MOCN découlant de leur structure sont :

- ✓ Puissance et vitesse élevées ;
- ✓ Robuste et bonne résistance à l'usure ;
- ✓ Déplacement rapide, précis, sans saccade,
- ✓ Accélération et décélération très élevées ;
- ✓ Spécifications métrologiques très serrées ;
- ✓ Frottement et jeu très faibles ;
- ✓ Peu de vibration ;
- ✓ Faible échauffement. [8] [9]

Tableau I.2. Quelques différences entre MO et MOCN. [7]

coût.		MOCN.	MO.	Commentaires.
Usinage	Machine.	↑	↓	Coût horaire MOCN supérieure de 50% à 300%.
	Matière.	↔	↔	
	Outil.	↑	↓	Généralement meilleur outil sur MOCN.
	Montage démontage pièce.	↔	↔	
	Contrôle.	↓	↑	Par échantillonnage en MOCN.
	Autres.	↔	↔	
Réglage.	Préparation machine.	↓	↑	Presque rien ou par programme sur

				MOCN.
	Réglage outil.	↔	↔	Peut-être plus simple en MOCN.
	Usinage première pièce.	↑	↓	Pas à pas sur MOCN.
	Contrôle et ajustement.	↓	↑	Ajustement numérique sur MOCN.
Méthodes	Analyse du dessin.	↔	↔	
	Gamme d'usinage.	↔	↔	
	Outils et paramètres de coupe.	↔	↔	
	Définitions des trajectoires.	↑	▪	
	Rédaction du programme.	↑	▪	
	Test et vérification.	↑	▪	

I.6. Domaine d'utilisation de MOCN

Les MOCN sont employées dans de nombreux secteurs industriels (Métallurgie, Bois, Textile). Elle est aussi associée à de nouvelles technologies de façonnage (Laser, Électro-érosion, Jet d'eau).

Les principaux procédés de fabrication sont concernés :

- ✓ Perçage, taraudage ;
- ✓ Tournage, alésage ;
- ✓ Fraisage ;
- ✓ Rectification ;
- ✓ Oxicoupage, soudure en continu, par points ;

- ✓ Poinçonnage, cisailage. [5]

I.7. Avantages et inconvénients liés aux MOCN

Tableau I.3. Avantages et inconvénients des MOCN. [6]

Avantages	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none"> ✚ Permet la réalisation d'usinages impossibles sur les machines conventionnelles : <ul style="list-style-type: none"> ○ Surfaces complexes ; ○ Très grand nombre d'opération ; ✚ Favorise les très petites séries et les pièces unitaires ; Prototypes : <ul style="list-style-type: none"> ○ Pièces en cours de conception ou modifiées fréquemment ; ○ Production à la demande ou juste à temps (réduction de la taille des lots) ; ✚ Précision : <ul style="list-style-type: none"> ○ Machines de meilleure qualité en général ; ○ Moins de montage, démontage de la pièce ; ✚ Fidélité de reproduction : Répétabilité (pas d'opérateur humain dans la chaîne de pilotage) ; 	<ul style="list-style-type: none"> ✚ Pour bénéficier de la majorité des avantages précédents, il faut que tout le parc machine de l'entreprise soit des MOCN ; <ul style="list-style-type: none"> ○ Investissement initial plus important. ○ Rentabilité pas immédiate. ✚ Amortissement impose souvent un travail en 2 ou 3 équipes ; ✚ Programmation et électronique demandant de la qualification. ✚ Fausse fragilité de l'électronique. ✚ Equipement annexe: ordinateur, logiciel, banc de réglage des outils, changeur d'outil. ✚ Changement dans les méthodes de préparation et de fabrication. ✚ Réticence du personnel au changement.

I.8. Architecture et organisation générale d'une MOCN

Comme pour tout système automatisé, nous pouvons décomposer la structure d'une MOCN en deux parties principales : la partie opérative et la partie commande.

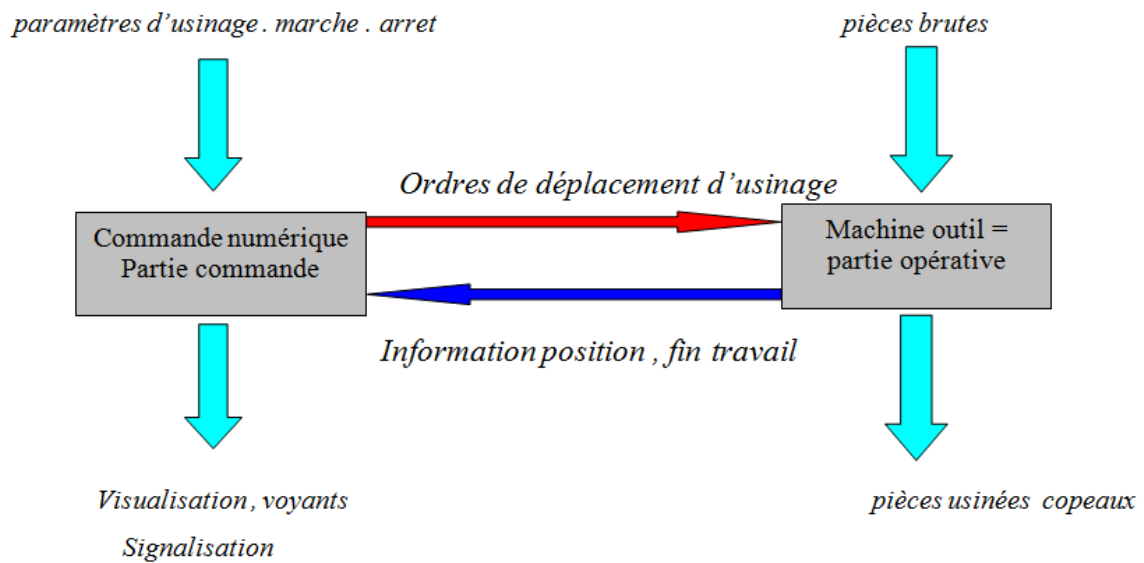


Figure I.3. Structure d'une machine à commande numérique.

I.8.1. Schéma simple d'une machine à commande numérique

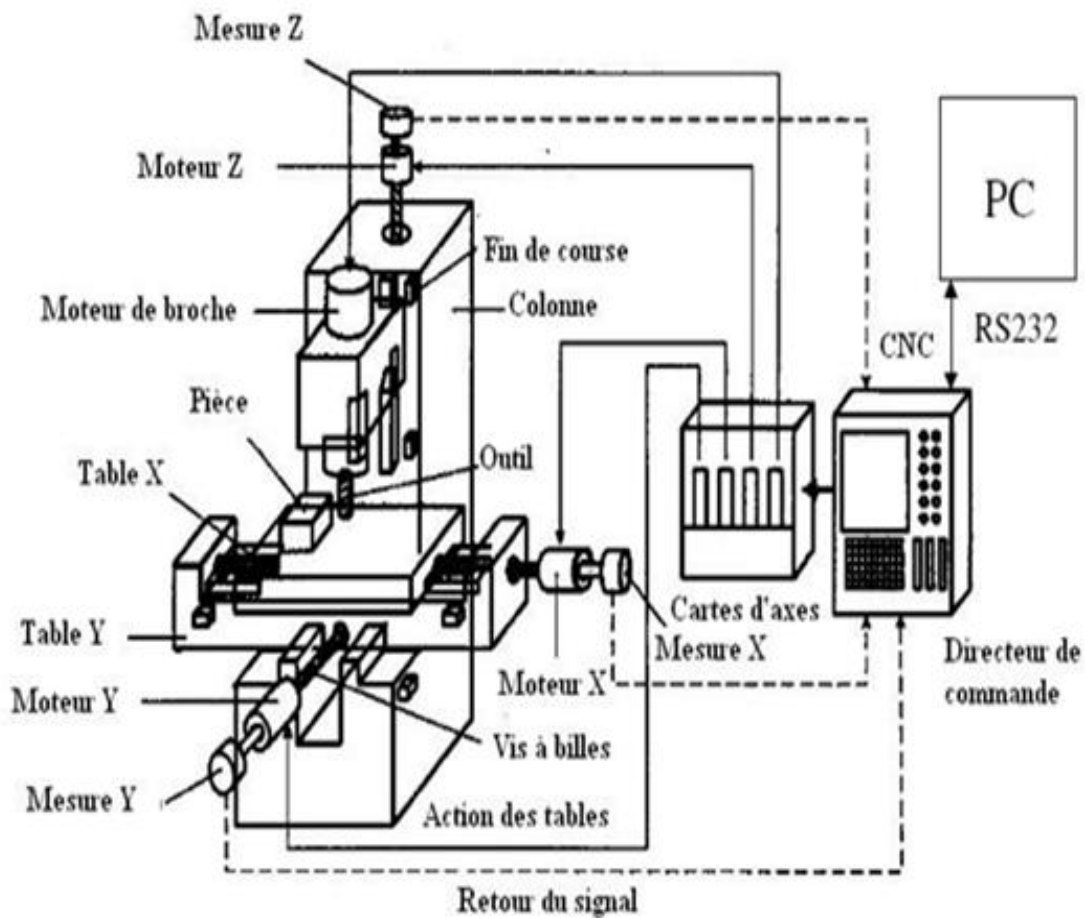


Figure I.4. Architecture d'une machine à commande numérique.

Les programmes d'usinage sont réalisés à partir d'une origine appelée « origine programme » (OP) positionnée par le programmeur. Le programme commande les déplacements relatifs entre le brut et les outils dans le but de réaliser l'usinage de la pièce finale. Ces déplacements sont réalisés dans un repère orthonormé normalisé $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ basé sur la structure de la machine.

L'axe \vec{z} de ce repère est un axe confondu avec celui de la broche de la machine — axe de rotation de la fraise en fraisage, axe de rotation de la pièce en tournage. Le sens positif de cet axe est donné par le sens d'éloignement de l'outil par rapport à la pièce. La détermination de l'axe \vec{x} entre les 2 axes restants se fait en identifiant celui qui permet le plus grand déplacement. Le sens positif de \vec{x} est déterminé par le sens logique d'éloignement de l'outil par rapport à la pièce.

L'axe \vec{y} est déterminé à partir de \vec{x} et \vec{z} grâce à la règle du trièdre direct. [4]

I.8.2. Eléments constitutifs de la partie commande et de la partie opérative

La MOCN est une machine totalement ou partiellement automatique à laquelle les ordres sont communiqués grâce à des codes qui sont portés sur un support matériel (disquette, cassette, USB, ...). Lorsque la machine-outil est équipée d'une commande numérique capable de réaliser les calculs des coordonnées des points définissant une trajectoire (interpolation), on dit qu'elle est à calculateur. Elle est appelée CNC (Commande Numérique par Calculateur). La plupart des MOCN sont des CNC.

Une machine-outil à commande numérique est composée de deux principales parties :

- ✓ Partie commande.
- ✓ Partie opérative. [5]

I.8.2.1. La partie opérative

Les mouvements sont commandés par des moteurs ; presque comparable à une machine-outil classique, et elle comprend :

- ✓ Un socle, très souvent en béton hydraulique vibré, assurant l'indépendance de la machine au sol,
- ✓ Un bâti, un banc, dont les larges glissières sont en acier traité,
- ✓ Un support outil (broche, torche, laser, jet d'eau ...),
- ✓ Une table support pièce, mobile selon 2 ou 3 axes, équipée de système de commande à vis et écrou à bille. Le granit, ou le granit reconstitué, est utilisé pour la fabrication des

tables et des bâtis des machines à mesurer tridimensionnelles des rectifieuses et de certains tours,

- ✓ Des moteurs chargés de l'entraînement de la table,
- ✓ Un élément de mesure ou capteur de position renseignant à tout moment sur la position du mobile sur chaque axe,
- ✓ Une dynamo tachymétrique assurant la mesure de la vitesse de rotation. [6]

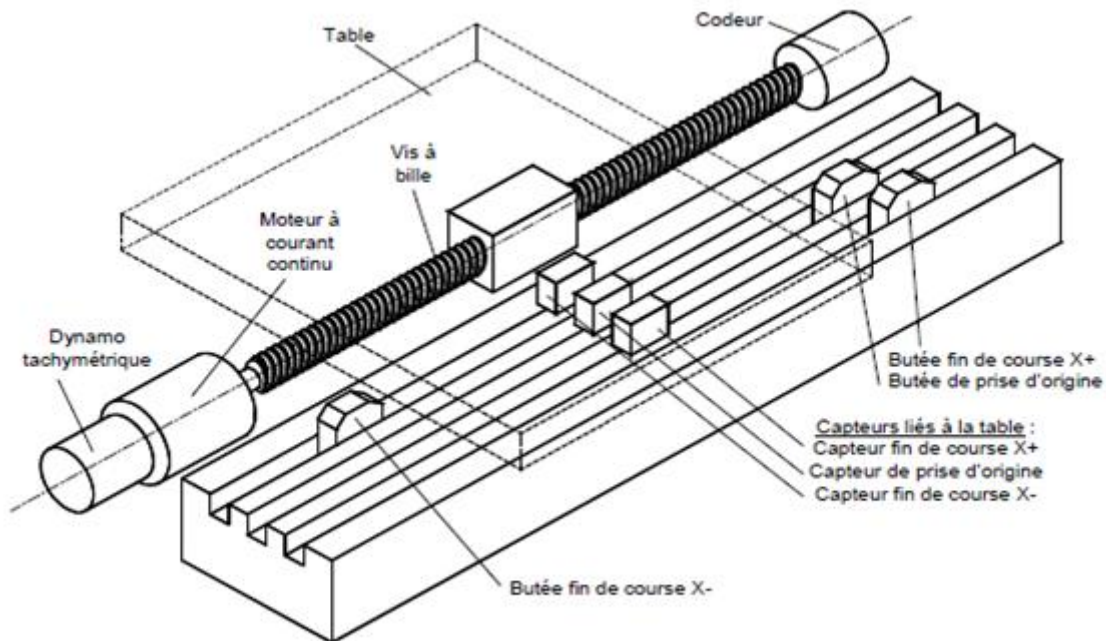


Figure I.5. Eléments de la partie opérative.

✚ Tâche effectuée

Les tâches effectuées sur le site de la partie opérative sont :

- ✓ Chargement et déchargement (pièce port pièce).
- ✓ Chargement et déchargement (outils port outils).
- ✓ Intervention manuelles nécessitées par l'usinage et l'entretien.
- ✓ Surveillance de commande. [6]

✚ Armoire électrique de relayage ou armoire de puissance

Elle est composée :

- ✓ Automate programmable gérant toutes les entrées – sorties ;
- ✓ Relais ;
- ✓ Electrovanes ;

- ✓ Cartes variateurs d'axes (une par axe) ;
- ✓ Contacteurs (1 par élément de machine : axes, broche) ;
- ✓ Interrupteur général avec sécurité. [6]

I.8.2.2. La partie commande

Différente d'une machine conventionnelle et constituée d'une armoire dans laquelle on trouve :

- ✓ Pupitre permettant de rentrer les commandes à l'aide d'un clavier,
- ✓ Lecteur de données (ce lecteur peut être une option lors de l'achat de la machine),
- ✓ Sortie RS 232 pour les liaisons avec les Périphériques externes,
- ✓ Ecran de visualisation de toutes les données enregistrées,
- ✓ Calculateur,
- ✓ Cartes électroniques (commandes d'axes, mémoire ...).

La partie commande est alimentée par un courant faible et ne peut donc pas alimenter en direct les moteurs de la machine (voir schéma ci-dessous). [6]

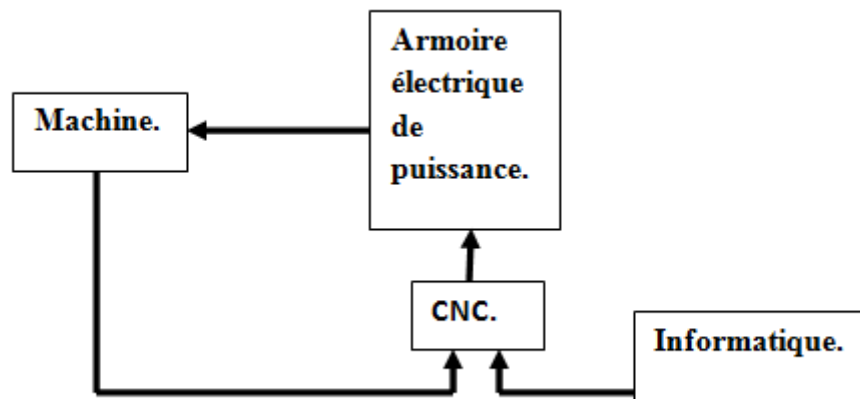


Figure I.6. Fonction originale d'une commande numérique.

I.8.3. Repérage des axes de MOCN

Les machines outils sont équipées au minimum de 3 axes de déplacements. Bien que le nombre d'axe ne soit pas en théorie limité, les constructeurs se limitent en général à un maximum de 5 axes.

Les 3 axes « basiques » sont les axes X, Y et Z. Ces 3 axes sont définis par la norme NF Z68-020.

- ✚ Axe Z : Axe de la broche de la machine outil. Le sens positif est donné par l'accroissement de la distance outil/pièce, la pièce étant fixe.
- ✚ Axe X : Axe du plus grand déplacement. Par défaut, le sens positif est donné vers la droite lorsque l'on fait face à la machine.
- ✚ Axe Y : Axe qui permet de former un trièdre X, Y et Z direct.

Les déplacements peuvent être assurés par trois sortes de moteurs :

- ✓ Moteur pas à pas.
- ✓ Moteur à courant continu.
- ✓ Moteur à courant alternatif.

Le mesurage des déplacements peut être assuré par :

- ✓ Des capteurs absolus (disque codé).
- ✓ Des capteurs relatifs (disque binaire). [3]

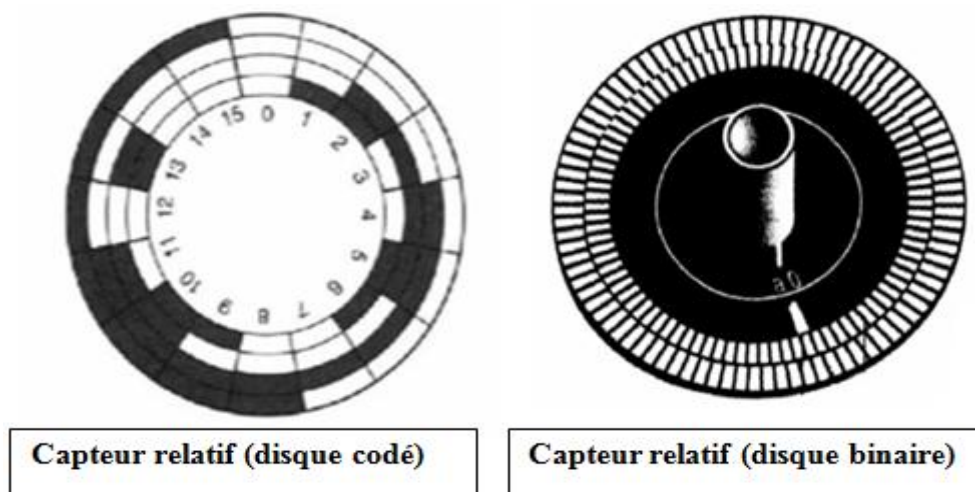


Figure I.7. Capteurs absolus et capteurs relatifs.

Pour éliminer le jeu de fonctionnement et diminuer le frottement on utilise un système vis-écrou à bille.



Figure I.8. Système vis-écrou à bille.

I.8.4. Asservissement d'un axe d'une MOCN

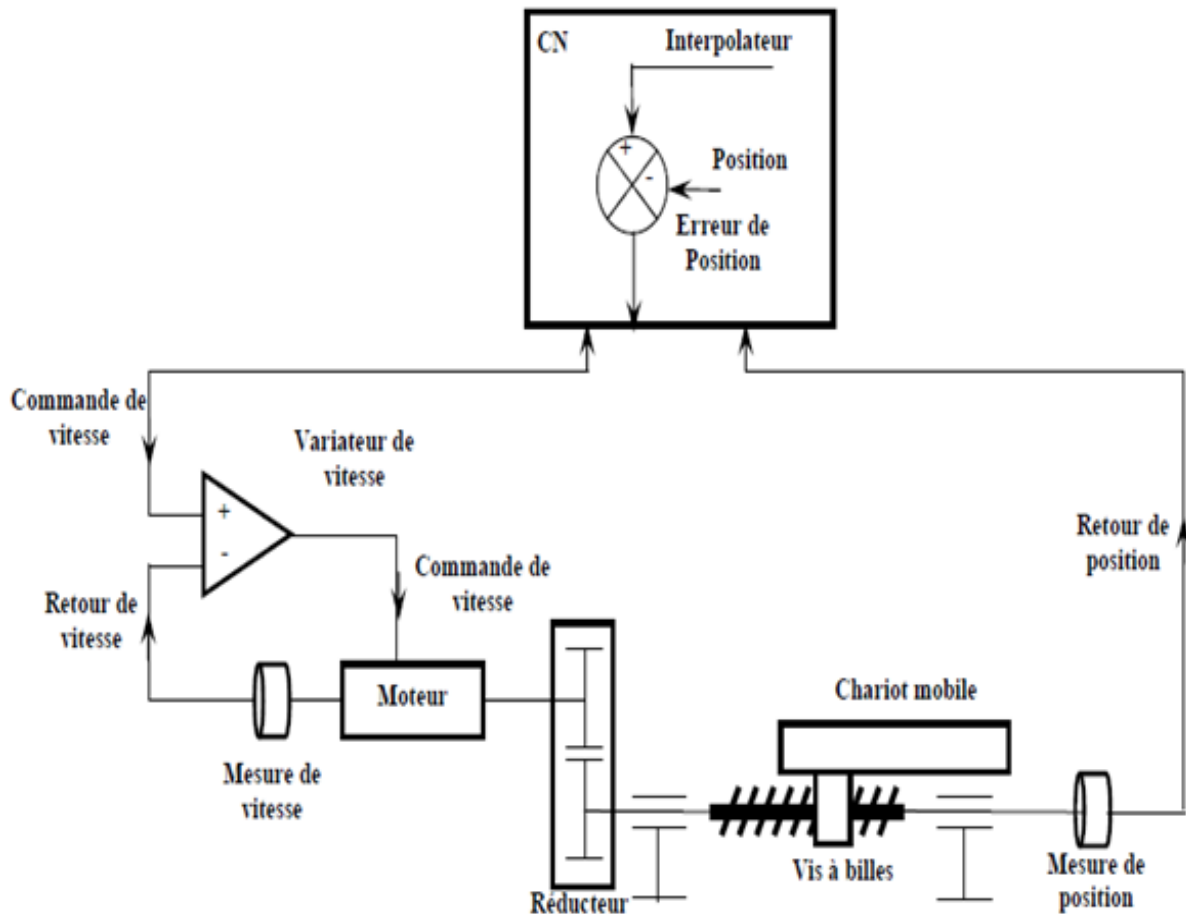
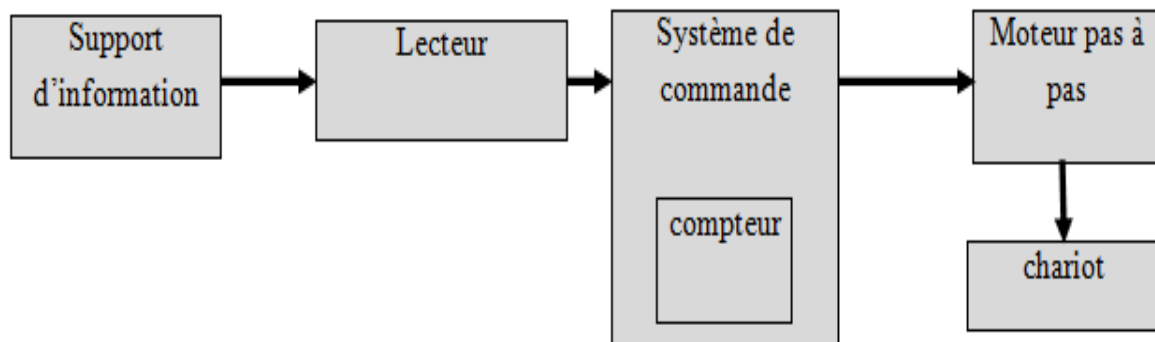
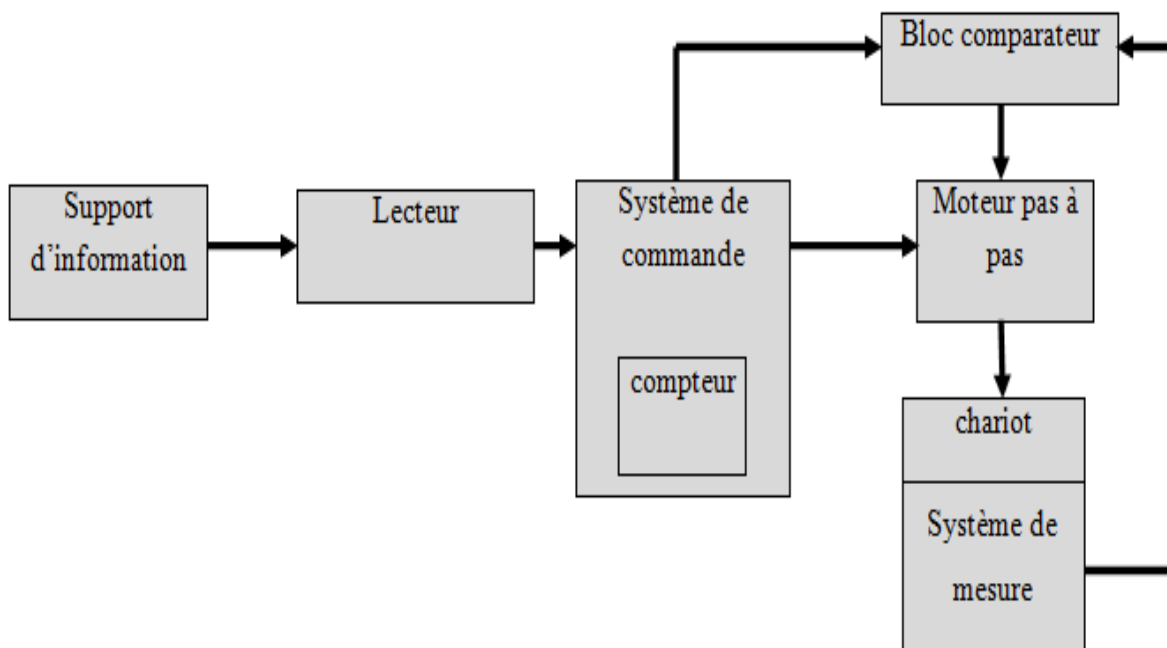


Figure I.9. Structure d'un axe de la MOCN.

Problème à résoudre ; contrôler à tout moment la vitesse d'avance et la position de l'outil par rapport à la pièce, et relier ces informations au mouvement programmé.

Sur les MOCN la connaissance de la position de l'outil par rapport à la pièce est obtenue par l'intermédiaire d'un capteur de position. Les informations recueillies sont analysées par le CNC et comparées aux informations contenues dans le programme d'usinage (cote à atteindre). C'est le calculateur qui remplace l'analyse de l'opérateur, et qui décide de la poursuite ou de l'interruption de l'usinage.

De même, la vitesse d'avance est gérée par le CNC. Elle est fixe, et fait partie d'une donnée du programme d'usinage, en avance linéaire. Elle est variable, et est calculée à tout instant en fonction de la position de l'outil par rapport à la pièce. En outre, le CNC peut gérer une décélération de vitesse d'avance à l'approche de la cote à atteindre (opération d'accostage). [5]

I.8.4.1. Système à boucle ouverte**Figure I.10.** Fonctionnement en boucle ouverte.**I.8.4.2. Système à boucle fermée****Figure I.11.** Fonctionnement en boucle fermée.**I.9. Classification des MOCN**

Les machines-outils à commande numérique (MOCN) sont classées suivant :

- ✓ Mode de fonctionnement de la machine.
- ✓ Nombre d'axes de la machine.
- ✓ Mode d'usinage.

- ✓ Mode de fonctionnement du système de mesure.
- ✓ Mode d'entrée des informations.

Les machines-outils à commande numérique (MOCN) peuvent être assistées d'une programmation extérieure et de mécanismes tendant à les rendre encore plus performantes, tels que :

- ✓ Ordinateur et ses périphériques.
- ✓ Commande adaptative.
- ✓ Préréglage des outils.
- ✓ Codage des outils.
- ✓ Chargeur d'outils et magasin.
- ✓ Chargeur et convoyeur de pièces.
- ✓ Combinaison de type d'usinages (centre de tournage, centre d'usinage).
- ✓ Table de montage.
- ✓ Évacuateur de copeaux.
- ✓ Dispositifs de contrôle de pièces. [10] [11]

I.9.1. Classification des MOCN selon le mode de fonctionnement

I.9.1.1. Fonctionnement en boucle ouvert

En boucle ouverte, comme l'illustre la (**Figure I.12**), le système assure le déplacement du chariot mais ne le contrôle pas. [10] [11]

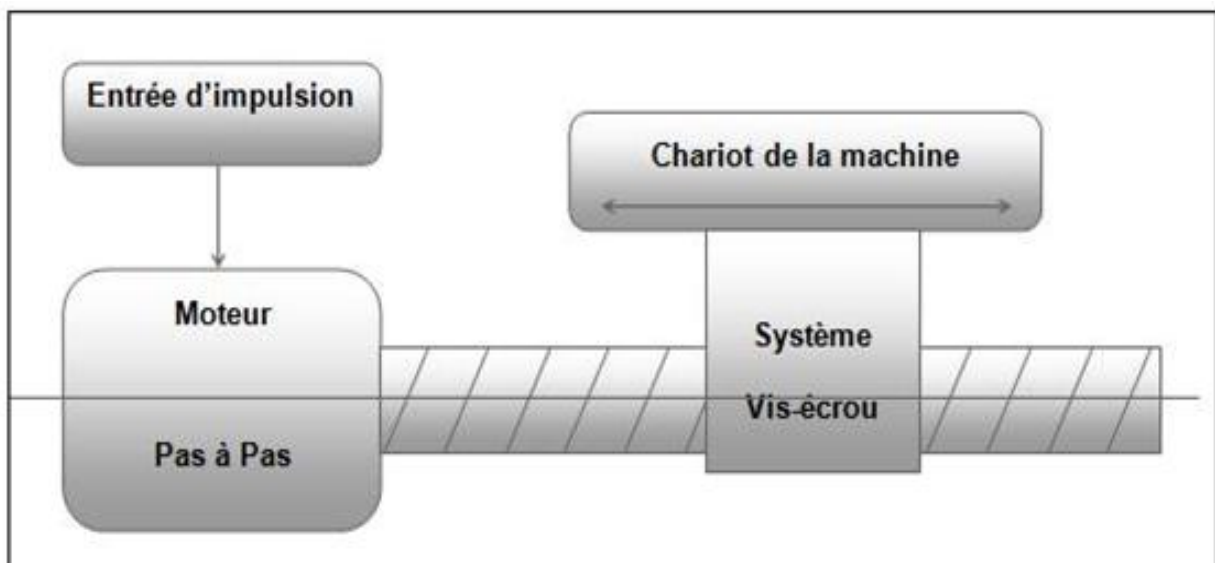


Figure I.12. Fonctionnement en boucle ouvert.

I.9.1.2. Fonctionnement avec commande adaptative

La commande adaptative réalise d'une façon continue et automatique l'adaptation des conditions de coupe. Des capteurs relèvent les valeurs de couple de la broche, l'amplitude de vibration de la broche, la température au point de coupe. Ces informations sont transmises à une unité spéciale qui les envoie vers le directeur de commande numérique qui agit selon l'analyse des informations sur les conditions de coupe pour permettre une meilleure qualité de travail, une meilleure productivité et une plus grande sécurité.

La (Figure I.13) illustre le fonctionnement de la commande adaptative. [10] [11]

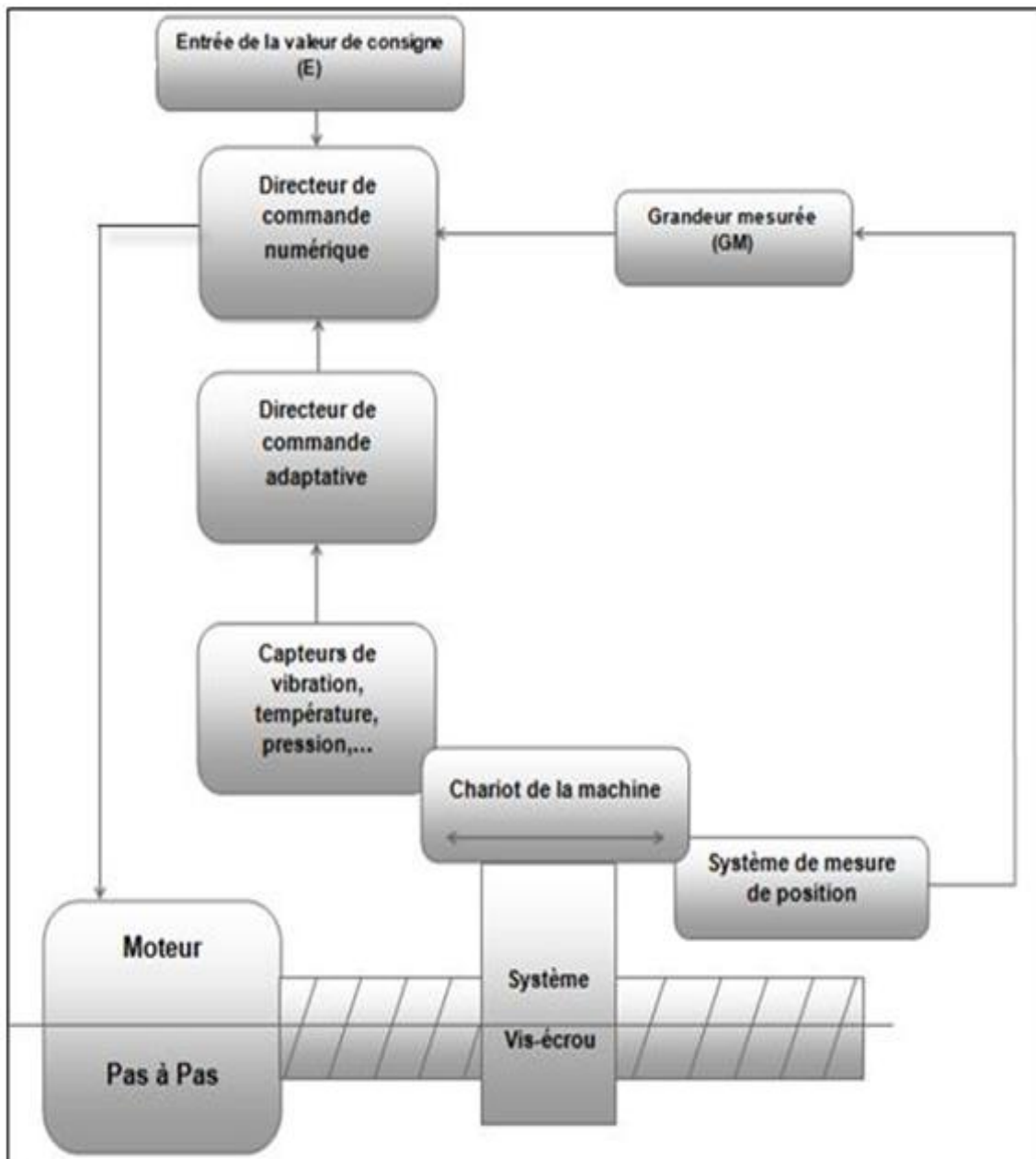


Figure I.13. Commande adaptative.

I.9.1.3. Fonctionnement en boucle fermé

En boucle fermée le système contrôle le déplacement ou la position jusqu'à égalité des grandeurs entrée (E) dans le programme et celui mesuré (GM).comme illustre la (Figure I.14). [10] [11]

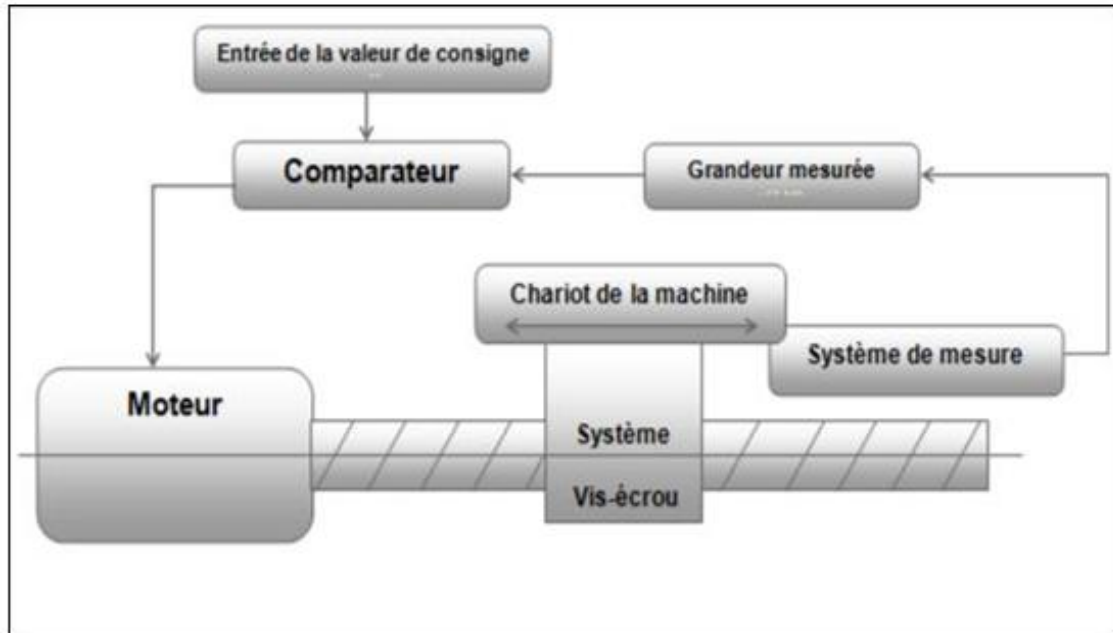


Figure I.14. Commande en boucle fermée.

I.9.2. Classification des MOCN selon le nombre d'axe

Les possibilités de travail des MOCN s'expriment en nombre d'axes de travail.

Un axe définit toute direction principale suivant laquelle le mouvement relatif de l'outil et de la pièce a lieu lorsqu' un seul des moteurs de déplacement fonctionne avec contrôle numérique continue.

Un demi-axe définit la direction dans laquelle l'avance n'est pas contrôlable numériquement mais contrôle par pistes, cames ou plateaux diviseurs.

Le **Tableau I.4.** Donne les différents axes utilisés en CN. [10] [11]

Tableau I.4. Axe des différents mouvements possibles. [10] [11]

translation			Rotation	
primaire	Secondaire	Tertiaire	Primaire	Secondaire
X	U	P	A	D

Y	V	Q	B	E
Z	W	R	C	

Chaque mouvement de translation ou de rotation est donc représenté par un axe défini une lettre affectée de signe + ou - . La figure suivante est montre l'ensemble des axes qu'un DCN peut contrôler.

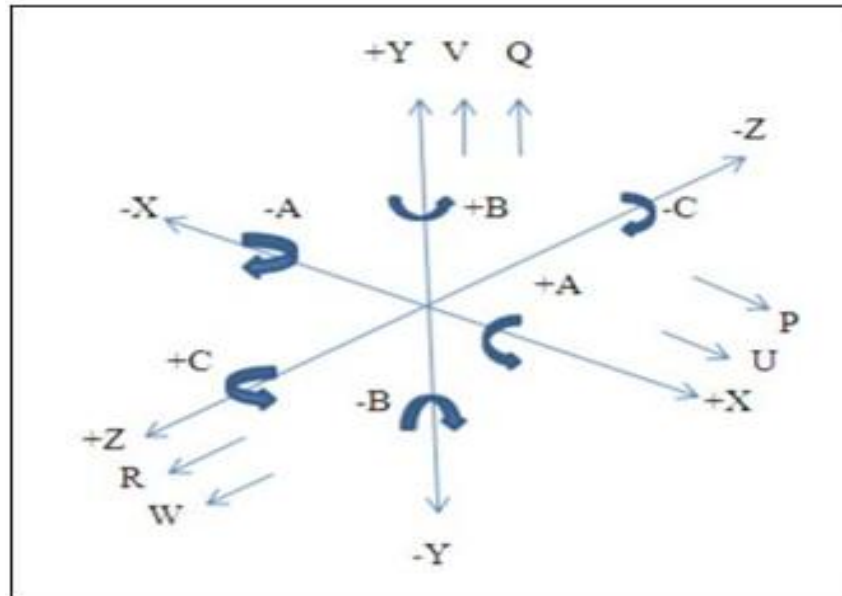


Figure I.15. Axes Primaires Et Axes Additionnels.

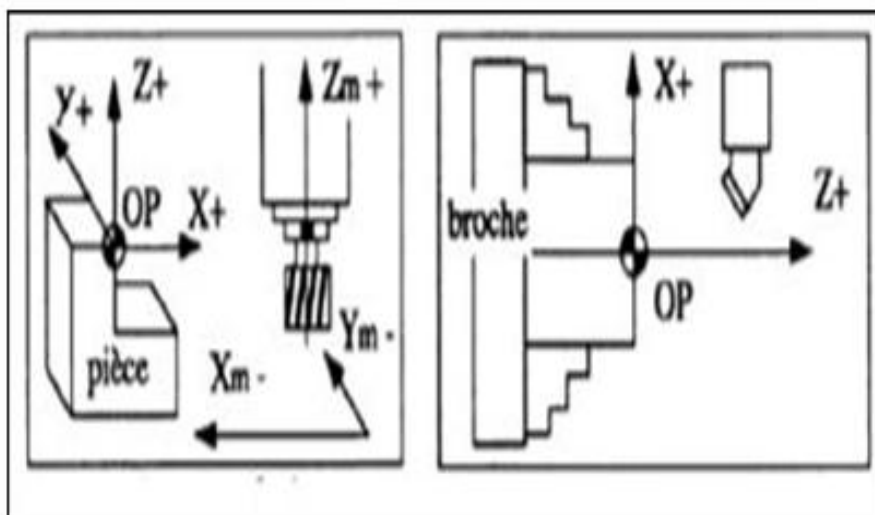


Figure I.16. Axes fraiseuse et tour.

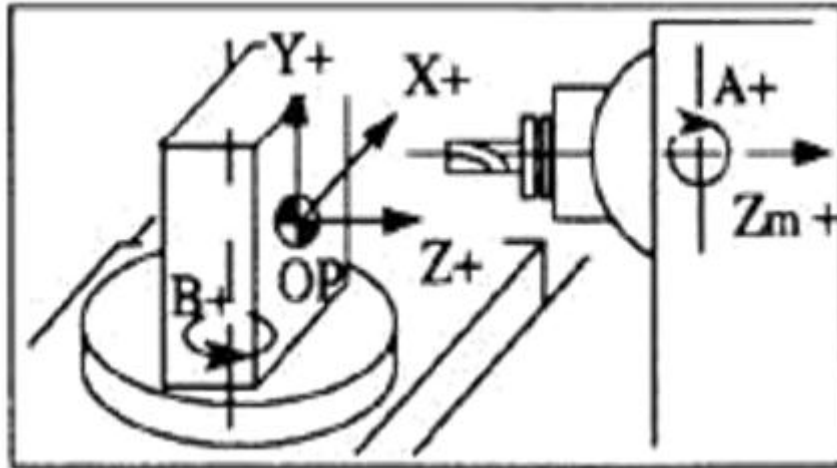


Figure I.17. Axes en centre de fraiseuse.

I.9.3. Classification des MOCN selon le mode d'usinage

Selon le mode d'usinage on peut classer les MOCN en trois catégories :

- ✓ Commande numérique point à point.
- ✓ Commande numérique paraxiale.
- ✓ Commande numérique de contournage. [10] [11]

I.9.3.1. Commande numérique point à point

C'est la mise position de l'outil ou de la pièce Par déplacements non synchronisés. Le mouvement de coupe (usinage) n'est possible que lorsque le mouvement de positionnement.

Exemples d'opération d'usinage : perçage, alésage, lamage taraudage, petit fraisage. [10] [11]

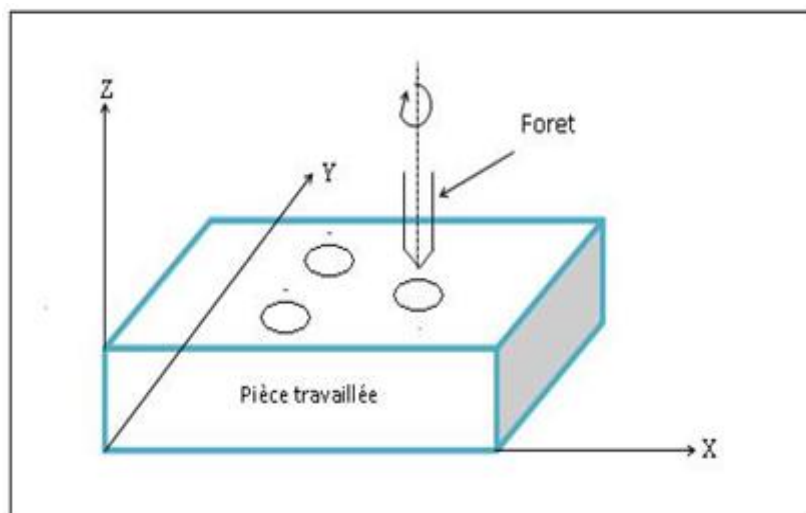


Figure I.18. Commande Numérique point à point.

I.9.3.2. Commande numérique paraxiale

Ce sont des déplacements parallèles aux axes avec les vitesses d'avance programmée. Le mouvement de coupe et de positionnement sont synchronisés de façon à avoir un usinage selon des trajectoires parallèles aux axes de déplacement.

Exemples d'opération d'usinage : tournage, fraisage, alésage. [10] [11]

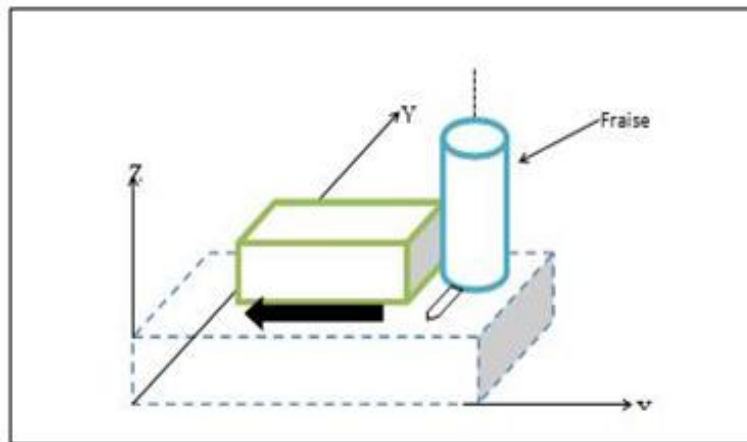


Figure I.19. Commande paraxiale.

I.9.3.3. Commande numérique de contournage

Ce sont des déplacements synchronisés des divers axes avec la vitesse d'avance programmée. Les trajectoires sont décomposées en éléments de droites ou de cercles dans un ou plusieurs plans.

Exemples d'opération d'usinage : toute opération possible sur un centre de tournage ou centre d'usinage. [10] [11]

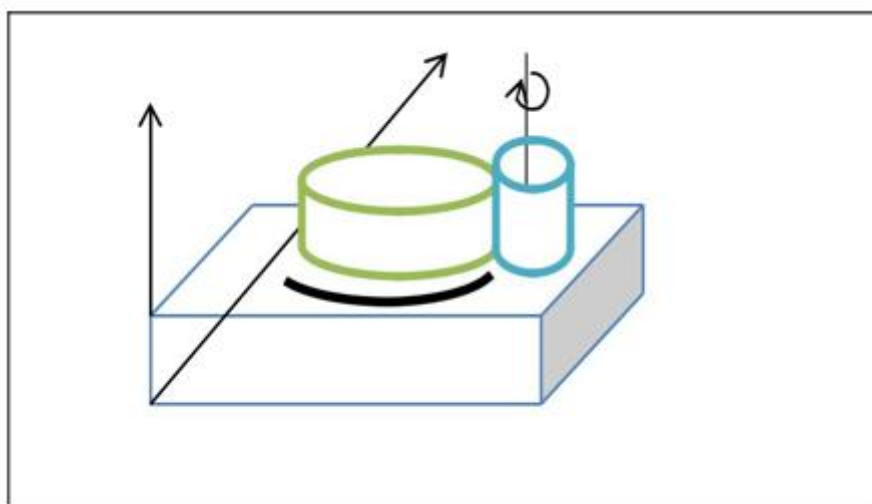


Figure I.20. Commande numérique de contournage.

Conclusion

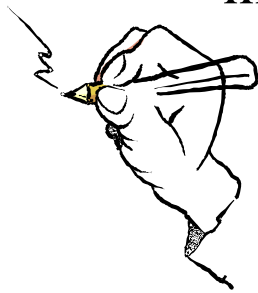
L'utilisation des MOCN présente un grand intérêt pour la fabrication en petite et moyenne série ainsi que pour les formes complexes des pièces à usiner.

La machine outil et son évolution actuelle, la machine outil à commande numérique représentent encore le moyen de production le plus important des pièces mécaniques. Une Machine Outil à Commande Numérique (MOCN) est une machine d'usinage à cycle automatique programmable.

Dans ce chapitre on a présenté une recherche bibliographique sur Les machines –outils à commande numérique (MOCN), les commandes les plus utilisées et les Classifications des MOCN.

Chapitre II. La méthodologie de programmation
manuelle.....**28-49**

Page



Introduction

La programmation est le travail de préparation qui consiste à transposer la gamme d'usinage de la pièce en un ensemble ordonné d'instructions comprises et exécutées par la CN en vue de réaliser son usinage. Ce travail peut être effectué manuellement ou avec l'assistance d'un ordinateur utilisant un langage de programmation évolué.

II.1. Généralités

À titre indicatif, la (**Figure II.1**) classe différentes méthodes de programmation en fonction des compétences du programmeur et de la complexité des machines à piloter.

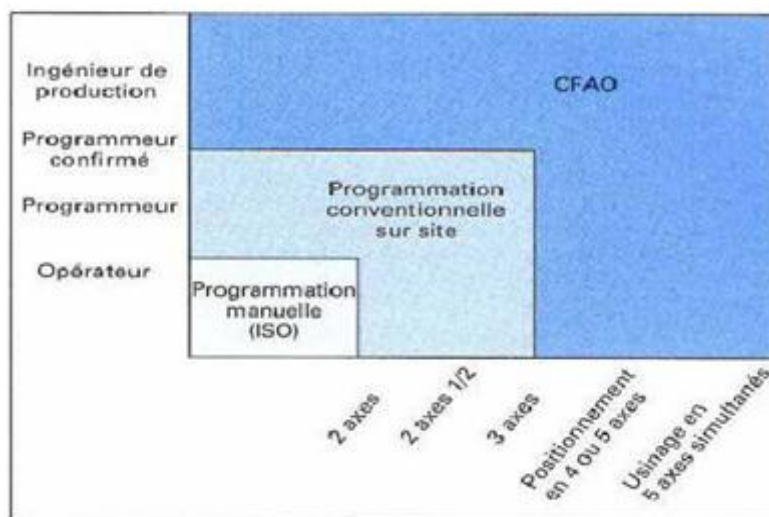


Figure II.1. Méthodes comparées de programmation.

La création d'un programme est soumise à des règles de structure, syntaxe ou format.

Les instructions programmées doivent contenir toutes les données nécessaires à la commande et au séquencement des opérations à réaliser pour assurer l'usinage de la pièce sur la machine.

Elles regroupent :

- ✓ Les données géométriques, qui permettent à la CN de calculer les positions successives de l'outil par rapport à la pièce pendant les diverses phases de l'usinage. Les positions sont définies par rapport à une origine connue.
- ✓ Les instructions indiquant le mode d'interpolation, le choix du mode de cotation, absolue ou relative, le choix du cycle d'usinage, le choix de l'outil, etc. ;

- ✓ Les données technologiques qui précisent les conditions de coupe optimales dans lesquelles pourra s'effectuer l'usinage. Elles concernent principalement la vitesse de rotation de la broche, les vitesses d'avance et la commande de l'arrosage.

II.2. Principe et méthodologie de programmation manuelle

Avant toute programmation proprement dite, il est important de planifier et de préparer méticuleusement les opérations d'usinage. Plus votre préparation aura été précise quant à la structure de votre programme CN, plus la programmation proprement dite sera simple et rapide et moins vous aurez d'erreurs dans le programme terminé. [5] [6]

II.2.1. Préparer le dessin de la pièce

- ✓ Définir l'origine de la pièce.
- ✓ Indiquer le système de coordonnées.
- ✓ Eventuellement calculer les coordonnées manquantes.

II.2.2. Définir le déroulement des opérations d'usinage

- ✓ Quels sont les outils à mettre en œuvre, à quel moment et pour le traitement de quel contour ?
- ✓ Dans quel ordre les différents éléments de la pièce devront-ils être usinés ?
- ✓ Quels sont les éléments qui se répètent et qui devraient figurer dans un sous-programme ?
- ✓ Est-ce que d'autres programmes pièce ou sous-programmes contiennent des contours susceptibles d'être utilisés pour la pièce actuelle ?

II.2.3. Définir la gamme de fabrication

Définir pas à pas toutes les phases d'opération de la machine, par exemple :

- ✓ Déplacements à vitesse rapide pour le positionnement.
- ✓ Changement d'outil.
- ✓ Définition du plan d'usinage.
- ✓ Dégagement pour les mesures.
- ✓ Mise en marche / arrêt de la broche, de l'arrosage.
- ✓ Appel des données d'outil.
- ✓ Approche de l'outil.
- ✓ Correction de trajectoire.

- ✓ Accostage du contour.
- ✓ Retrait de l'outil.

II.2.4. Traduire les opérations dans le langage de programmation

Transcrire chaque opération sous la forme d'un bloc CN (ou de blocs CN).

II.2.5. Regrouper toutes les opérations en un programme

Le regroupement des opérations doit obéir aux règles de programmation.

II.3. Constitution et normalisation des codes en programmation manuelle

Un programme CN se compose d'une suite de blocs CN. Chaque bloc contient les données pour l'exécution d'une opération d'usinage. Il est divisé en 3 domaines : En-tête de programme, corps de programme et fin de programme. Ensemble, ces domaines constituent la gamme d'usinage.

Les blocs CN sont formés des composantes suivantes :

- ✓ Instructions selon un langage de programmation (exemple : DIN 66025)
- ✓ Eléments du langage évolué CN

Les instructions sont constituées d'un symbole d'adresse et d'un chiffre ou d'une suite de chiffres qui décrit une valeur arithmétique. [5] [6]

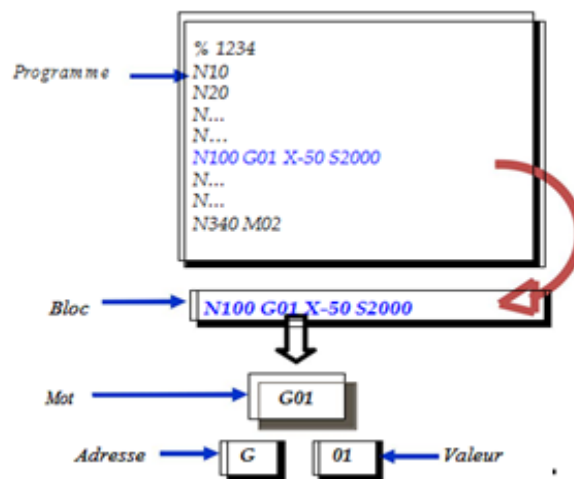


Figure II.2. Structure et contenu d'un programme CN.

II.3.1. Format d'un mot

Le mot définit une instruction ou donnée à transmettre au système de commande.

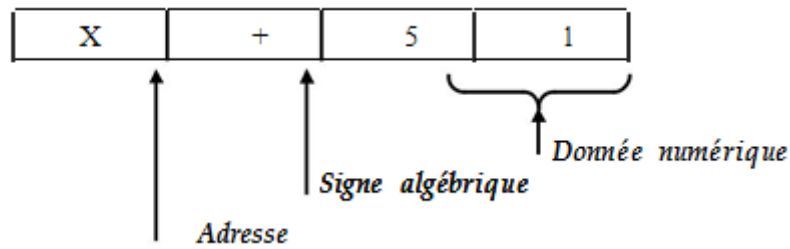


Figure II.3. Format d'un mot.

Le symbole d'adresse (généralement une lettre alphabétique) définit la signification de l'instruction. Exemples :

Tableau II.1. Symbole d'adresse.

Symbole d'adresse	Signification
G	Fonction G (fonction préparatoire)
X	Information de déplacement pour l'axe X
S	Vitesse de rotation de broche

La suite de chiffre est la valeur affectée au symbole d'adresse. Elle peut contenir un signe et un point décimal, le signe étant toujours placé entre la lettre adresse et la suite de chiffres. Les signes positifs (+) et les zéros de tête (0) n'ont pas besoin d'être écrits.

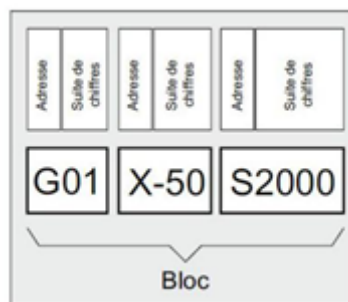


Figure II.4. Bloc de chiffres.

Dans le cas de la programmation des opérations d'usinage complexes des machines-outils modernes, il a été complété par les éléments du langage évolué CN.

Il s'agit, entre autres, des éléments suivants :

- ✓ Les instructions du langage évolué CN se composent de plusieurs lettres d'adresse. Par Exemple :

- + OVR pour la correction de vitesse de rotation.
- + SPOS pour le positionnement de broche.
- ✓ Descripteurs (noms définis) pour :
 - + Variables système cas de "Programmation CN flexible ou paramétrée".
 - + Variables définies par l'utilisateur cas de "Programmation CN flexible ou paramétrée".
 - + Sous-programmes.
 - + Etc....
- ✓ Les instructions peuvent être modales ou non modales :
 - **Modal.**

Les instructions à effet modal restent valides avec la valeur programmée au-delà du bloc dans lequel elles sont programmées, jusqu'à :

- + La programmation d'une nouvelle valeur sous la même instruction
- + La programmation d'une instruction qui annule la validité de l'instruction qui était valide jusque-là
- **Non modal.**

Les instructions à effet non modal sont valides uniquement dans le bloc dans lequel elles ont été programmées.

Le dernier bloc des séquences d'exécution contient un mot spécifique pour la fin du programme : **M2**, **M17** ou **M30**.

Les règles applicables pour affecter des valeurs aux adresses sont les suivantes :

- ✓ Il faut écrire le caractère "=" entre l'adresse et la valeur qui suit si :
 - + L'adresse se compose de plusieurs lettres,
 - + La valeur se compose de plusieurs constantes.
- ✓ On peut omettre le signe "=" si l'adresse est constitué d'une seule lettre et la valeur à affecter d'une seule constante.
- ✓ Les signes sont autorisés.
- ✓ Les caractères de séparation sont permis après les lettres de l'adresse. [5]

❖ **Exemples :**

X10 : Affectation d'une valeur (10) à l'adresse X, "=" n'est pas requis.

X1=10 : Affectation d'une valeur (10) à l'adresse (X) avec extension numérique (1), "=" requis.

X=10*(5+SIN (37.5)) : Affectation d'une valeur par le biais d'une expression numérique, "=" requis.

II.3.2. Format de bloc

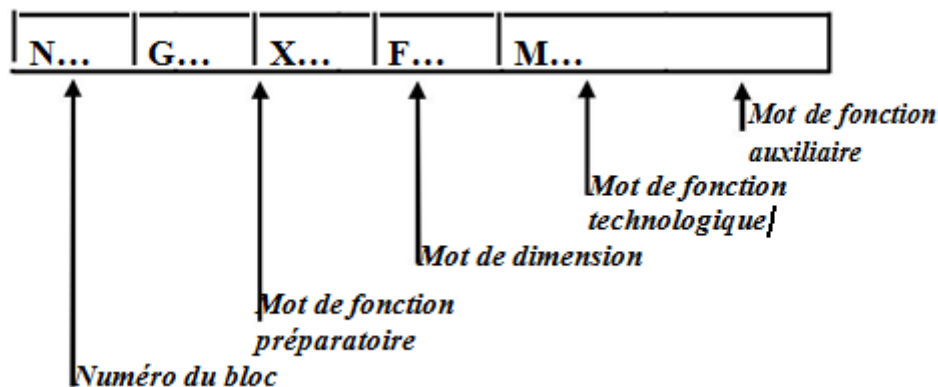


Figure II.5. Format de bloc.

La numérotation n'intervient pas dans l'ordre de déroulement du programme. Il est malgré tout conseillé de numéroter les blocs dans l'ordre d'écriture.

Dans des cas particuliers, un bloc se termine par le caractère (;) (EOB = End Of Bloc) ou LF (LINE FEED = nouvelle ligne).

Afin d'obtenir une structure de bloc claire, il est conseillé de placer les instructions d'un bloc dans l'ordre suivant :

N... G... X... Y... Z... F... S... T... D... M... H...

Pour qu'un programme CN soit plus compréhensible, il est possible d'ajouter des commentaires aux blocs CN. Un commentaire se situe à la fin d'un bloc et est séparé de la partie programme du bloc CN par un point virgule (";"). [5]

II.3.3. Structure générale d'un programme

Un programme est exécuté dans l'ordre d'écriture des blocs situés entre les caractères de début et de fin de programme.

II.3.3.1. Structure d'un programme ISO

La programmation structurée permet d'analyser et de concevoir plus rapidement un programme de commande numérique. En effet, toutes les opérations d'usinage font appel à un certain nombre de fonctions identiques (appel d'outil, rotation de broche, mise en route et arrêt de la lubrification, conditions de coupe, dégagement d'outil, etc.). [6]

Il est donc intéressant de choisir une structure de programmation commune pour toutes ces opérations, valable quelle que soit la machine utilisée et indépendante de la pièce à obtenir.

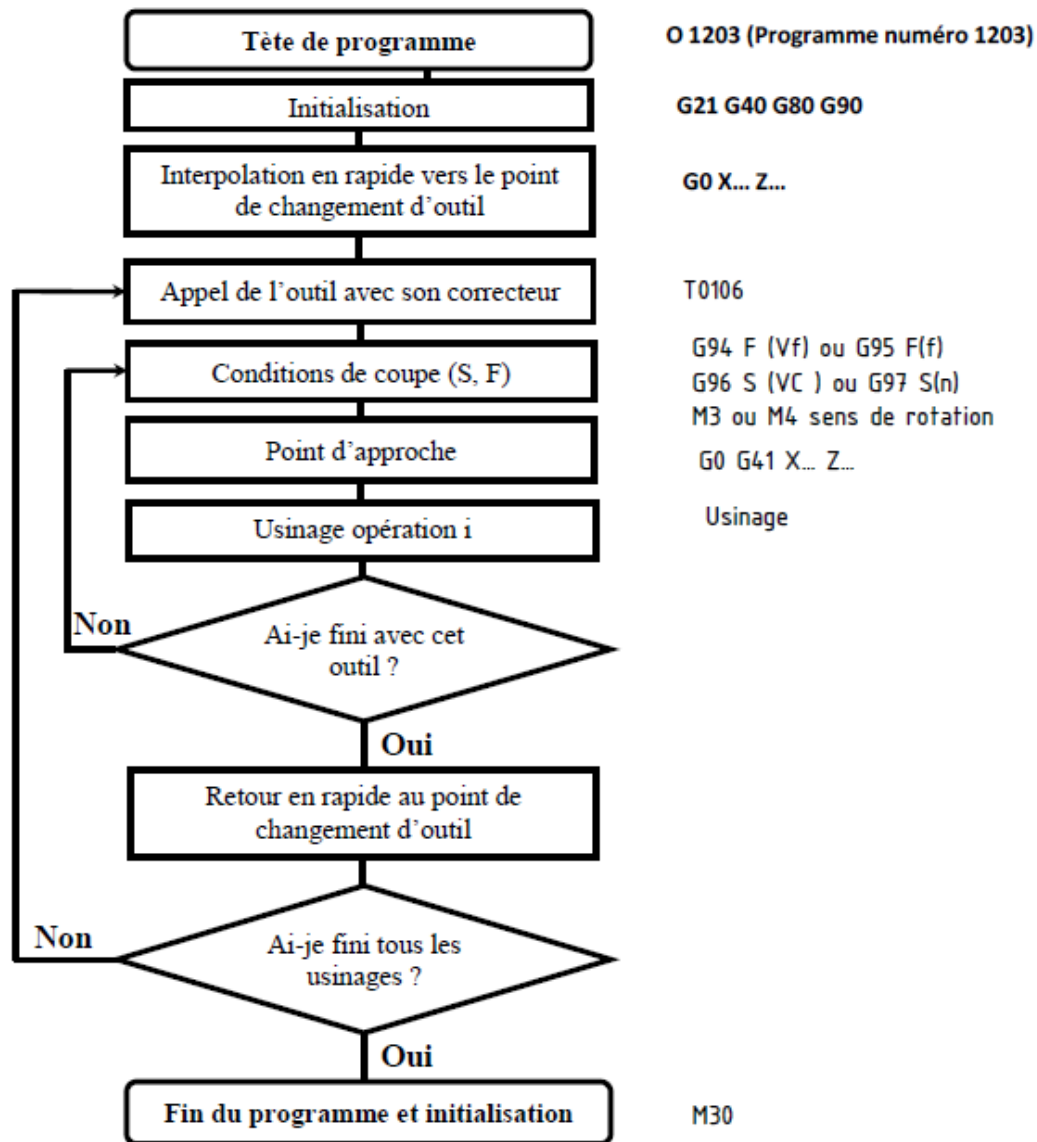


Figure II.6. Structure d'un programme ISO.

II.4. Programmation ISO

II.4.1. Mode de programmation

En programmation absolue, la cotation se réfère à l'origine du système de coordonnées après décalage total.

En programmation relative, la valeur numérique programmée de l'information de déplacement correspond à la distance à parcourir. Le signe indique le sens de déplacement.[7]

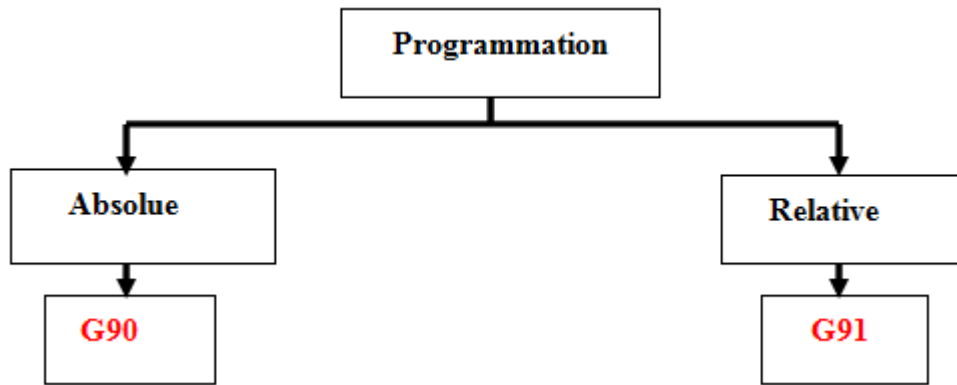


Figure II.7. Mode de programmation.

✚ Syntaxe : N.. G90 /G91 X..

G90 : Programmation absolue par rapport à OP.

G91 : Programmation relative par rapport à OP.

✚ Propriétés : G90 et G91 sont deux fonctions modales. G90 est initialisée à la mise sous tension.

✚ Révocation : Les fonctions G90 et G91 se révoquent mutuellement. [7]

○ Cas de tournage

Tableau II.2. Mode de programmation d'un tournage. [6]

En G90	Position actuelle : X40 Z0	Position X50 Z-40	Position Z1
En G91		X5 mm sens (+) Z40 mm sens (-) X5 Z-40	Z41 mm sens (+) Z41

○ Cas de fraisage

Tableau II.3. Mode de programmation d'un fraisage. [6]

En G90	Position actuelle : X10 Y30	Position X30 Y10	Position X60 Y30
En G91		X20 mm sens (+) Y30 mm sens (-) X20 Y-30	X30 mm sens (+) Y20 mm sens (+) X30 Y20

II.4.2. Interpolation linéaire

✚ Syntaxe:

N... [G90 / G91] G00 / G01 X.. Y... Z..

G00 : Interpolation linéaire à vitesse rapides.

G01 : interpolation linéaire à vitesse programmée. [7]

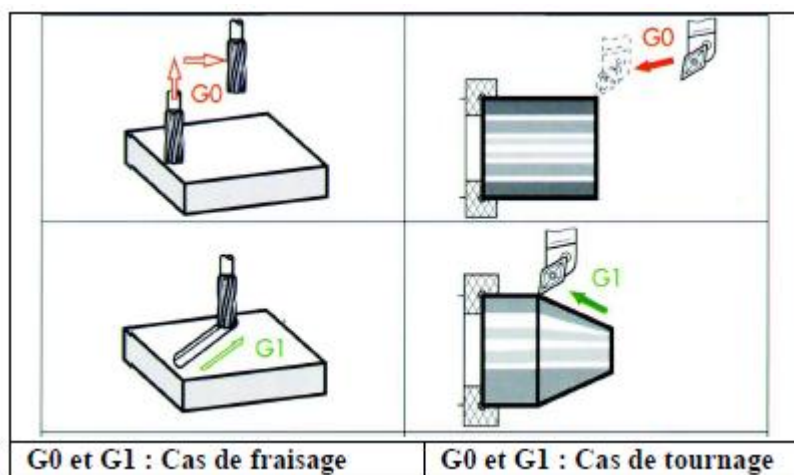


Figure II.8. Les fonction de programmation de G0 et G1.

II.4.3. Interpolation circulaire

✚ Syntaxe :

N.. [G90/G91] G02/G03 X.. Y.. I..J../R..[F..].

G02 : Interpolation circulaire sens horaire.

G03 : Interpolation circulaire sens antihoraire.

X, Y : Coordonnées du point d'arrivée de l'arc.

I, J : Coordonnées du point central.

I : suivant X.

J : suivant Y (Dans la plupart des cas en relatif).

✚ Propriétés :

G02 et G03 sont deux fonctions **modales**.

✚ Révocation :

La fonction G02 est révoquée par G00, G01, G03.

La fonction G03 est révoquée par G00, G01, G02. [7]

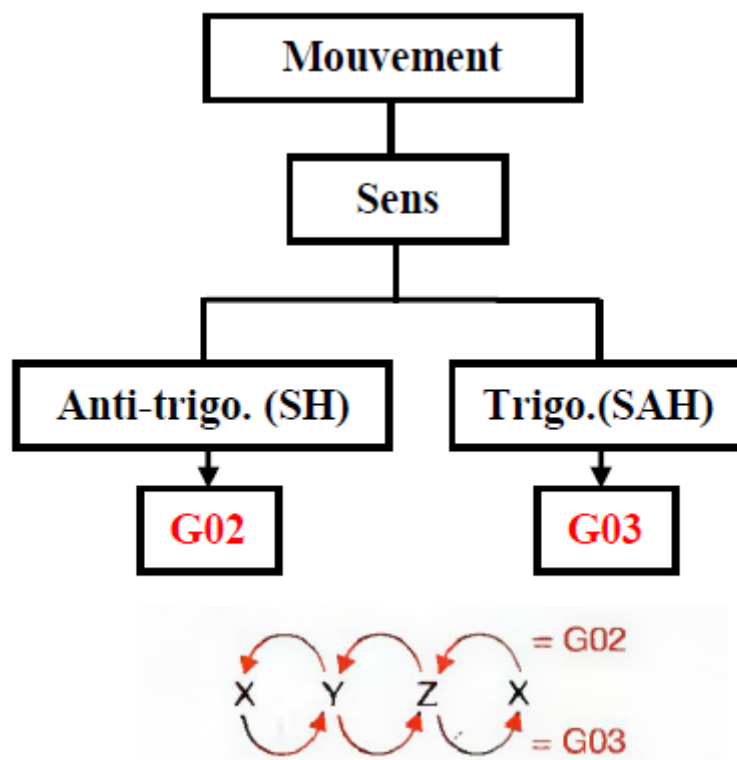


Figure II.9. Interpolation circulaire.

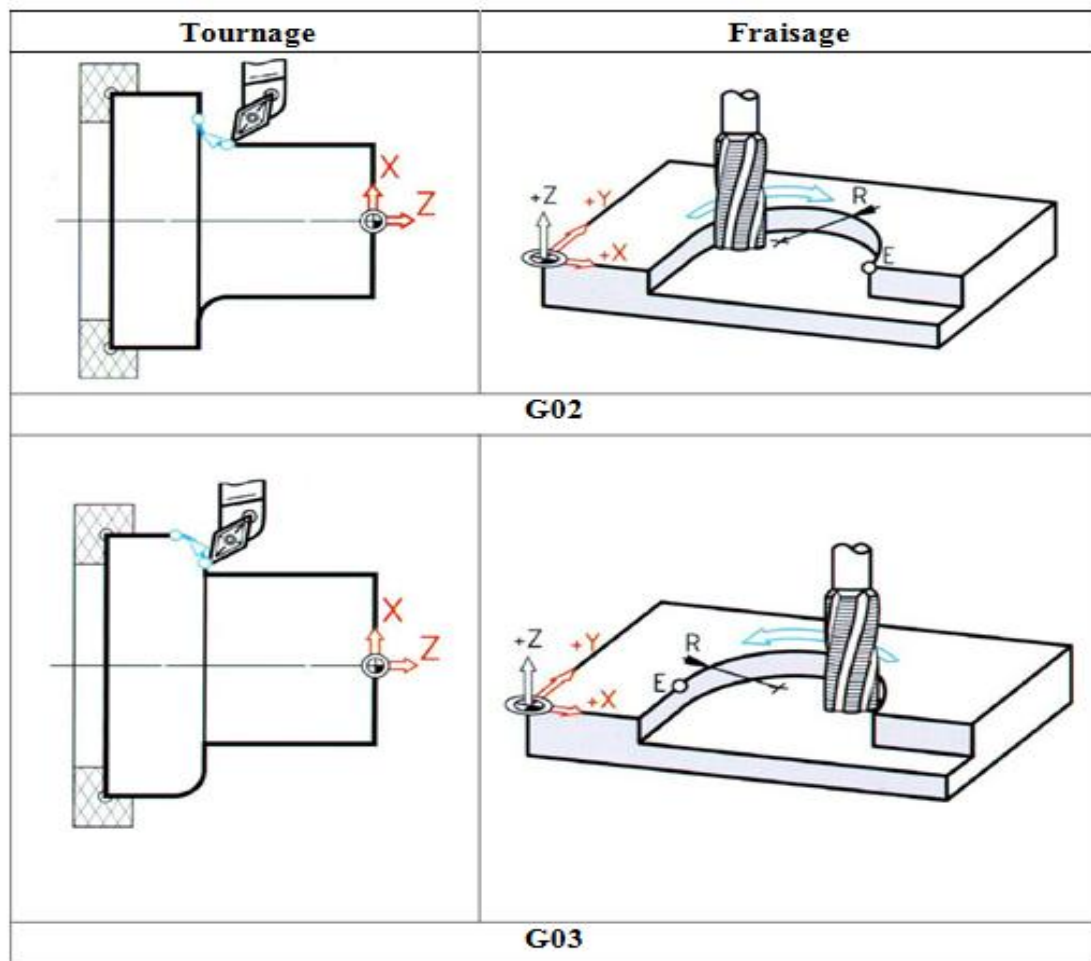


Figure II.10. Les fonctions de programmation de G02 et G03.

II.4.4. Choix du plan d'interpolation (fraisage)

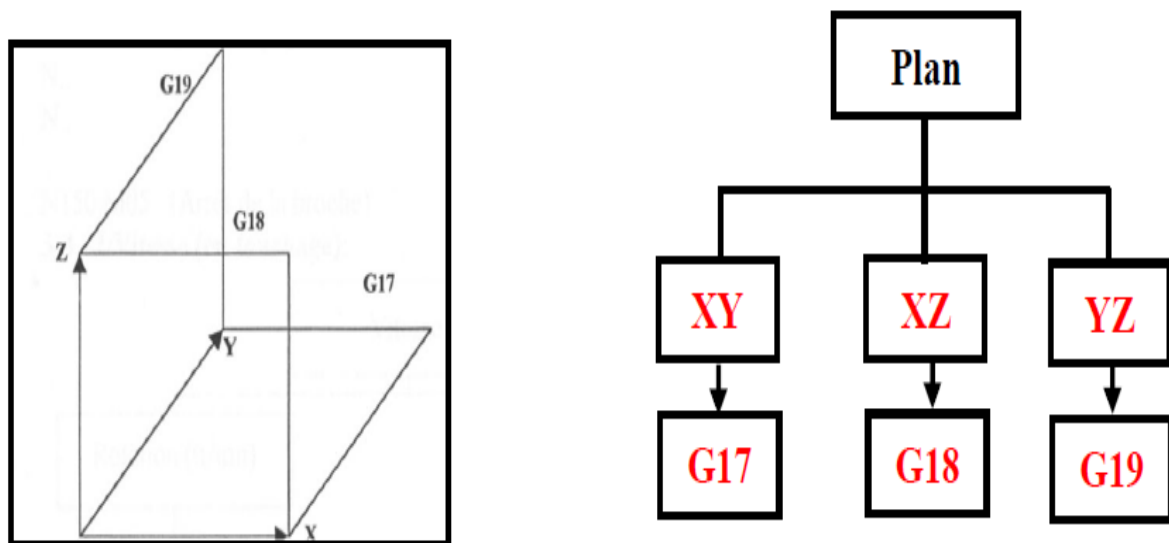


Figure II.11. Choix du plan d'interpolation (fraisage).

✚ **Remarque** : Si le plan n'est pas précisé G17 est retenu par défaut par le système. [7]

II.4.5. Commande de la broche

II.4.5.1. Rotation

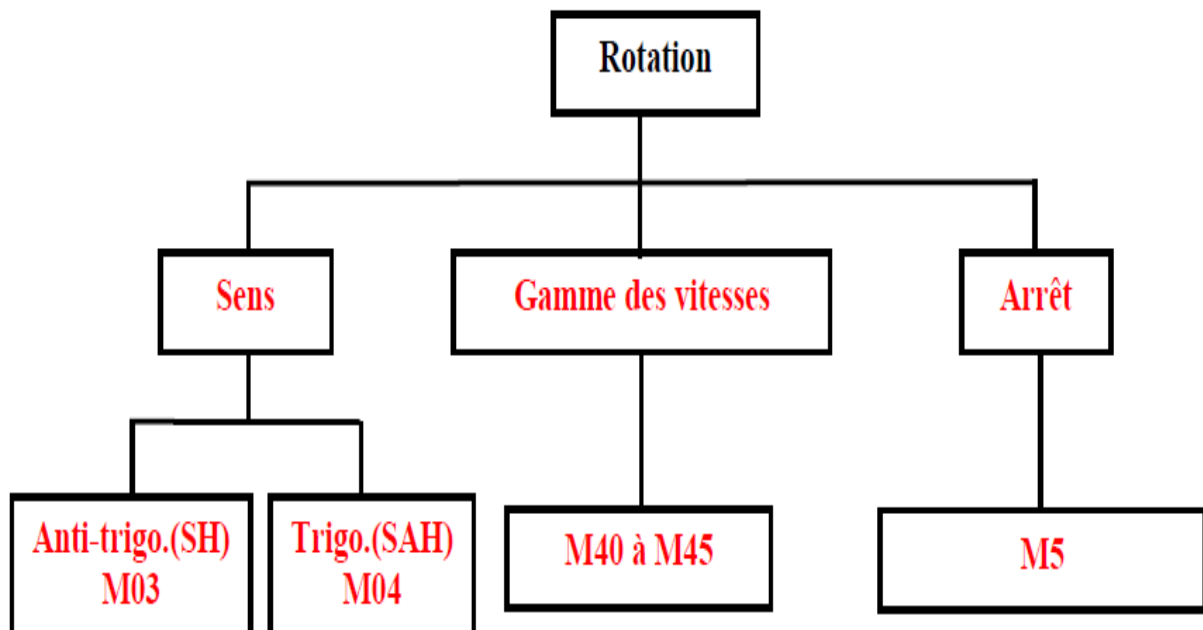


Figure II.12. Rotation de la broche.

✚ Syntaxe :

N.. M03/M04/M05

✚ Propriétés :

- ✓ Les fonctions M03 et M04 sont modales «avant ».
- ✓ La fonction M05 est une fonction modale « après » initialisée à la mise sous tension.
- ✓ Les fonctions M40 à M45 sont des fonctions modales « avant ».

✚ Révocation :

Les fonctions M03, M04 et M05 se révoquent mutuellement. Les fonctions M00, M19 et M01 révoquent l'état M03 ou M04. [7]

❖ Exemple :

N..

N50 S500 **M3 M41** (Rotation sens anti-trigonométrique, gamme M41)

N..

N150 M05 (Arrêt de la broche)

II.4.5.2. vitesse

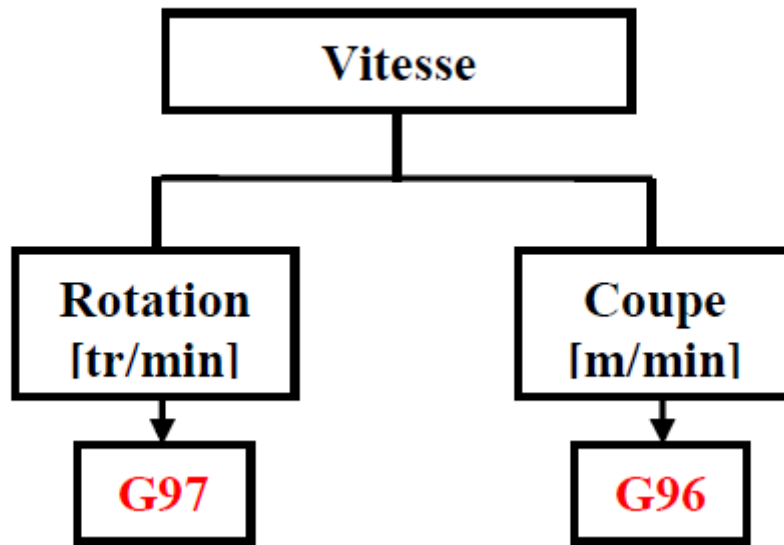


Figure II.13. Vitesse de la broche.

✚ Syntaxe :

N.. **G97** S... [M03/M04]

N.. **G96** [X.] S... [M03/M04]

G97 : Vitesse de broche exprimée en tr/mn.

G96 : Vitesse de coupe constante exprimée en m/min.

S : Argument obligatoire lié à la fonction et définissant la vitesse programmée.

✚ Propriétés :

La fonction G97 est une fonction modale initialisée à la mise sous tension. La fonction G96 est une fonction modale.

✚ Révocation :

La fonction G97 est révoquée par G96 S.. .

La fonction G96 est révoquée par G97 S.. .

❖ Exemple :

N...

N100 G97 S900 M40 M04 (Rotation de broche à 900 tr/mn).

N110 ... X50 Z70 (Positionnement du nez de l'outil sur diamètre 50).

N120 G96 S200 (Initialisation de la V.C.C sur X=50).

N.. G97 S900 (Annulation de V.C.C).

✚ **Remarque :**

Concernant l'usinage en tournage avec vitesse de coupe constante et pendant une opération de dressage, le diamètre tend vers zéro. Alors il faut penser à limiter la vitesse de rotation maximale avec la fonction **G92**

✚ **Syntaxe :**

N... G92 S...;

✚ **Propriétés :**

La fonction G92 est modale.

✚ **Révocation :**

La limite de la vitesse est annulée par :

- ✓ La fonction d'annulation G92 S0.
- ✓ La fonction G92 S... affectée d'une vitesse limite différente.
- ✓ La fonction de fin de programme M02.
- ✓ Une remise à l'état initial (RAZ). [7]

II.4.6. Mode d'avance

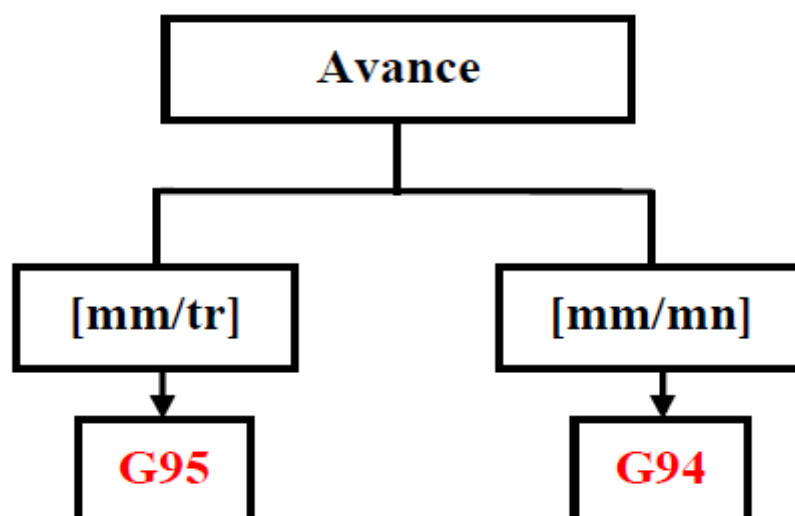


Figure II.14. Mode d'avance.

+ Syntaxe:

N.. G95F.. G01/G02/G03 X..Z..

N.. G94F.. G01/G02/G03 X..Y../X..Z..

+ Propriétés:

La fonction G94 est une fonction modale initialisée à la mise sous tension. La fonction G95 est une fonction modale.

+ Révocation :

Les fonctions G94 et G95 se révoquent mutuellement. [7]

❖ Exemple 1 : (fraisage).

N...

N50 G0 X..Y..

N60 G94 F200 (Vitesse d'avance en mm/min).

N70 G1 X..Y..

N..

❖ Exemple 2 : (tournage).

N..

N50 G0 X..Z..

N60 G95 F0.3 (vitesse d'avance en mm/tr)

N70 G 1 X..Z..

N..

II.4.7. Programmation des outils**II.4.7.1. Appel d'outil et des correcteurs d'outil en tournage [FANUC]****+ Syntaxe :**

N.. T0106

T: La fonction « T » appelle l'outil.

01: Appel ou chargement de l'outil n°1.

06: Appel ou chargement du correcteur n°6. [6]

II.4.7.2. Appel d'outil et des correcteurs d'outil en fraisage [SINUMERIK-SIEMENS 840D]

Syntaxe :

N... T=" nom de l'outil" N5 M6 D...

Propriétés :

Dans le cas de magasins à chaîne, à plateau tournant et à râtelier, le changement d'outil s'effectue normalement en deux opérations :

- ✓ L'instruction **T** recherche l'outil dans le magasin.
- ✓ Puis l'instruction **M** charge l'outil dans la broche.

Dans le cas des tourelles révolvers installées sur les tours, le changement d'outil (autrement dit la recherche et la mise en place de l'outil) est uniquement exécuté par l'instruction **T**.

Le changement d'outil doit être accompagné des opérations suivantes :

- ✓ Activation des valeurs de correction d'outil enregistrées sous un numéro **D**
- ✓ Programmation du plan de travail correspondant. Ceci est nécessaire pour que la correction de longueur d'outil soit affectée au bon axe. [6]

❖ Exemple :

N4T=" FRAISE_2T_Diam20" D1..... « Recherche de l'outil "FRAISE_2T_Diam20" dans le magasin et activation de correcteur D1.

N5 M6..... Montage de l'outil dans la broche.

N6 S1200 M3 F350

II.4.8. Correcteur d'outils G41-G42

- ✓ G41 : correction du rayon à gauche du profil à usiner.
- ✓ G42 : correction du rayon à droite du profil à usiner.
- ✓ G40 : annulation du correcteur de rayon

Syntaxe :

N.. [D..] [G0/G1/G2/G3] G41/G42 X..Y../X..Z..

N.. [G0/G1] G40 X.. Y../X..Z..

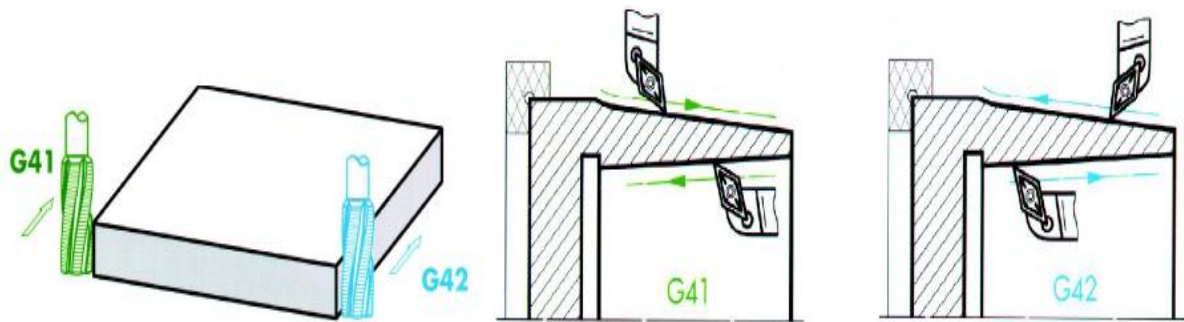


Figure II.15. Correcteur d'outils G41-G42.

✚ Propriétés :

Les fonctions G41 et G42 sont modales.

La fonction G40 est initialisée à la mise sous tension.

✚ Révocation :

Les fonctions G41 et G42 se révoquent mutuellement.

La fonction G40 révoque les fonctions G41 et G42. [5]

❖ Exemple de programmation avec correction de trajectoire de rayon d'outil.

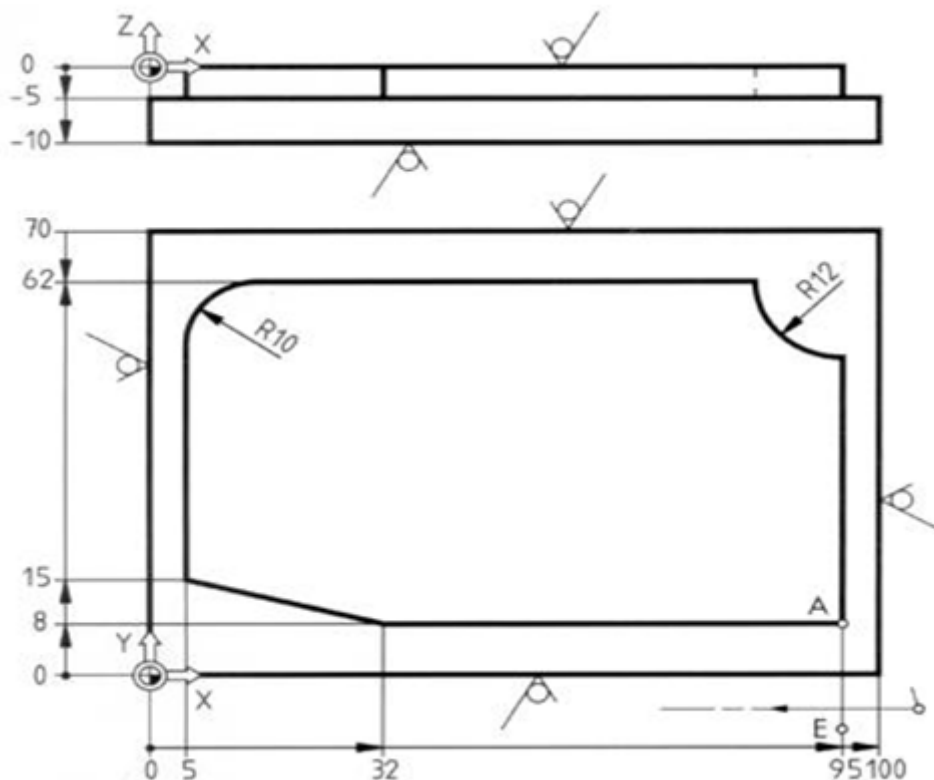


Figure II.16. Exemple de programmation avec correction de trajectoire de rayon d'outil.

❖ **Données :**

- ✓ L'outil « Fraise 2 T_20» Fraise à deux tailles de diamètre 20 mm.
- ✓ Vitesse de coupe : $V_c = 30$ m/min.
- ✓ Avance : $F = 80$ mm/min.
- ✓ A : début de contour.
- ✓ E : Fin de contour.

Tableau II.4. feuille de programme.

N1 G17 G40G71 G90 G94	En-tête de programme.
N2 G54	Décalage d'origine.
N3 WORKPIECE („BOX", 112, 0,-10, -100, 0, 0, 100, 70)	Définition de la pièce brute.
N4 T="Fraise 2T_20"	Sélection de l'outil "Fraise 2T_20" du magasin.
N5 M6	Montage de l'outil dans la broche.
N6 S478 M3F80	Conditions de coupe, vitesse de broche et avance.
N7 G0 X112 Y-2	Approche au point d'insertion cycle d'usinage.
N8 G41 Z-5	CRF à gauche du profil et prise de la profondeur de la passe.
N9 G1 X95Y8 M8	Approche vers début de contour (A) et l'activation arrosage.
N10 X32	
N11 X5 Y15	
N12 Y52	

N13 G2 X15Y62 I10 J0	Usinage du contour.
N14 G1 X83	
N15 G3 X95Y50 I12 J0	
N16 G1 Y-12	
N17 G40 G0 Z100 M9	Dégagement en Z et désactivation de l'arrosage.
N18 X150 Y150	Dégagement en X et en Y.
N19 M30	Fin de programme.

II.4.9. Condition d'enchaînement des trajectoires

L'arrêt précis est utilisé pour l'exécution d'angles saillants ou la finition d'angles rentrants. Le critère d'arrêt précis détermine la précision d'accostage du coin et l'instant où a lieu le changement de bloc. [6]

✚ En tournage

G09 : Arrêt précis en fin de bloc avant enchaînement sur le bloc suivant.

G09 permet de résoudre l'erreur de poursuite E_p . [6]

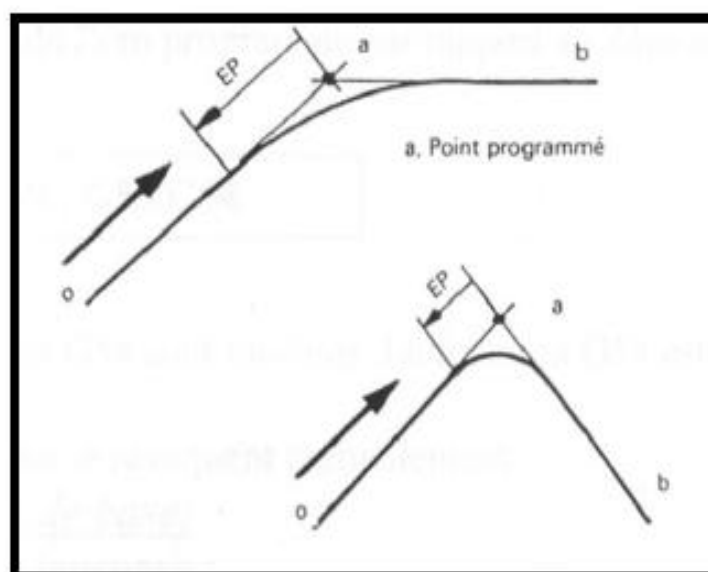


Figure II.17. Condition d'enchaînement des trajectoires en tournage.

En fraisage

G60 : Instruction d'activation de l'arrêt précis à effet modal.

G09 : Instruction d'activation de l'arrêt précis à effet non modal.

G601 : Instruction d'activation du critère d'arrêt précis "Arrêt précis fin".

G602 : Instruction d'activation du critère d'arrêt précis "Arrêt précis grossier".

G603 : Instruction d'activation du critère d'arrêt précis "Fin de l'interpolation". [6]

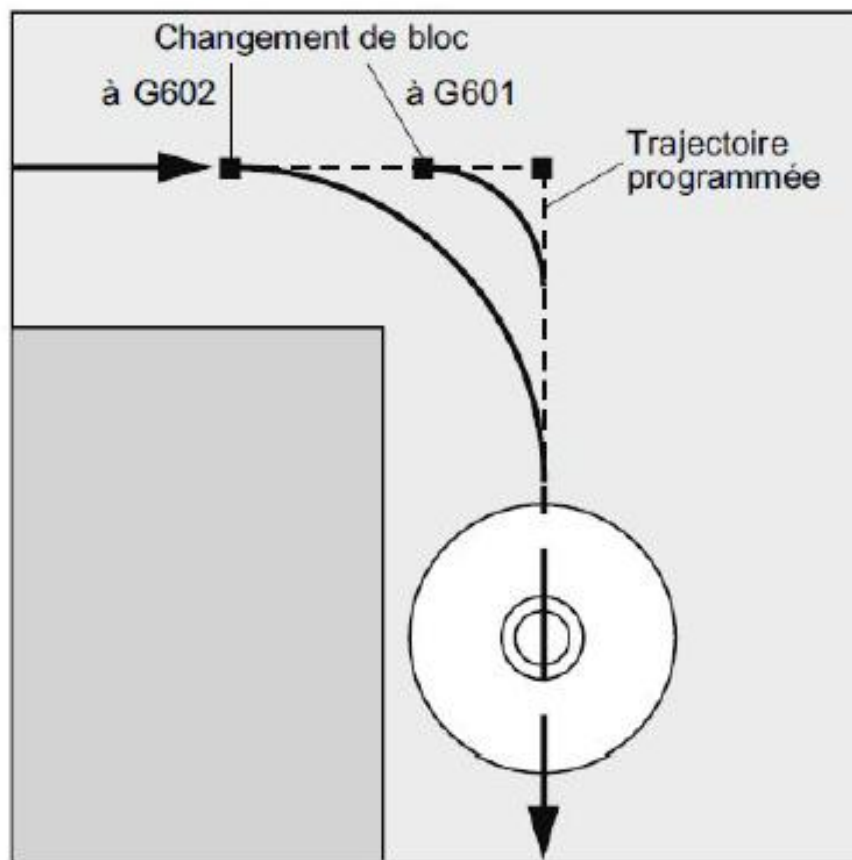


Figure II.18. Condition d'enchaînement des trajectoires en Fraisage.

✚ Syntaxe :

N.. G09 [G00/G1/G2/G3] X.. Z.. [F..]

✚ Propriétés :

La fonction G09 est une fonction non modale, elle est révoquée en fin de bloc. G60 le génère dans le bloc courant et dans tous les blocs suivants.

Avec les instructions de contournage G64 ou G641 - G645, G60 est désactivé. [6]

❖ Exemple :

N5 G602	; Critère ‘ ‘ Arrêt précis grossier ‘ ‘ activé
N10 G0 G60 Z...	; Arrêt précis modal actif
N20 X... Z...	; G60 continue d’agir
N50 G1 G601	; Critère ‘ ‘ arrêt précis fin ‘ ‘ activé
N80 G64 Z...	; Commutation sur contournage
N100 G0 G9	; Arrêt précis s’applique uniquement dans ce bloc
N110 ...	; Réactivation du contournage

II.5. Qualité et rôle du programmeur humain dans les systèmes à commande numérique

Dans tous les systèmes à commande numérique, c’est l’ensemble homme-machine qui doit être considéré.

Si l’opérateur qui utilise la machine a un rôle plus réduit que dans la conduite manuelle d’une machine, son rôle étant alors essentiel de la surveillance. Par contre, toute la responsabilité du travail incombe à un nouveau venu qui intervient au stade de la préparation, il s’agit du programmeur chargé de préparer les instructions qui permettent à la machine d’effectuer dans les meilleures conditions le travail demandé.

Les qualités exigées du programmeur sont nombreuses :

- ✓ Excellente connaissance de la machine-outil.
- ✓ Entraînement très poussée collecte de toutes les informations détenues par les différentes responsables des processeurs etc....

En contre partie, le résultat final ne dépend plus de l’adresse de l’opérateur surveillant le fonctionnement de la machine ainsi qu’il a été vu plus haut les temps improductifs sont nettement réduits. Enfin, les rebuts de fabrications se trouveront supprimer. [10]

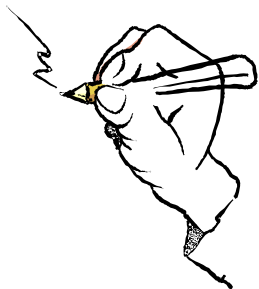
Conclusion

La programmation manuelle c'est de communiquer à la machine des instructions nécessaires à l'exécution des diverses opérations. Ces instructions sont traduites en informations codées directement utilisables par des équipements électroniques associés à la machine.

Dans ce chapitre on a décrit le logiciel code-G et ses fonctions préparatoires et auxiliaires. Ainsi on a présenté la structure et le contenu d'un programme CN en code-G, et on a cité aussi les notions de base de programmation en fraisage.

***Chapitre III. Conception et réalisation d'une
fraiseuse 3 axes.....50-81***

Page



Introduction

L'introduction d'une CN dans une entreprise ne peut en aucun cas être considérée comme un simple remplacement de la machine conventionnelle. Par contre son adaptation doit être bâtie sur une base solide qui se résume en la progression de la production.

Donc la CN se justifie par son aspect économique et sa qualité productive qui conduisent l'entreprise à des résultats profitables avec des chances réelles d'évolution rapide.

III.1. Caractéristiques techniques de sélection des MOCN

Avant de choisir une machine outil, il faut consulter plusieurs constructeurs, où la plupart de ces derniers offrent un large choix de machine.

Donc pour faire un bon choix, il faut bien contrôler et comparer entre ces différents facteurs qui suivent : [10]

III.1.1. Aspect de la machine

III.1.1.1. Bâti et structure

Pour éviter les vibrations et obtenir une grande précision, il faut que la structure de la machine soit d'une grande rigidité.

Les éléments mécaniques doivent avoir :

- ✓ Des paliers sans jeux.
- ✓ Un faible coefficient de frottement.
- ✓ Une faible inertie.

III.1.1.2. Glissières

Le tableau qui suit nous donne les différents critères de choix sur les glissières qui existent :

Tableau III.1. Les critères de choix sur les glissières.

Glissières	Coefficient de frottement	Précision
A frottement	moyen	Moyenne
Hydraulique	faible	Assez grande

A roulements	Très faible	Très grande
---------------------	-------------	-------------

D'après nos recherches, nous avons constaté que les glissières à roulement seront les plus convenables à utiliser.

III.1.1.3. Les vis-mères

Tableau III.2. Les critères de choix sur les vis.

Type	Coefficient de frottement	Jeux de fonctionnement	Flexion	Domaine d'application
Vis-mère	moyen	faible	grande	Course moyenne
Crémaillère et pignon	Faible	moyen	moyenne	Course longue
Vis à billes	Très faible	Très faible	Très faible	Courses moyennes et faibles

D'après nos recherches, nous avons constaté que les vis à billes seront les plus convenables à utiliser.

III.1.1.4. Organes de transmission

Les machines à commande numérique possèdent des vis avec noix pourvues de billes précontraintes donc exemptes de jeu, ce qui permet le travail en avalant qui soulage l'effort de coupe.

III.1.1.5. Les moteurs

Les moteurs peuvent être choisis selon la gamme de vitesse, leurs précisions ou bien leurs moments transmis.

Tableau III.3. Les critères de choix sur les moteurs.

Moteurs	Précision	Vitesses	Moment transmis	Taux d'utilisation
à courant-continu	Elevée	Elevée	Grand	Grand

Pas à pas	Moyenne	Moyenne	moyen	petit
Pas à pas électrohydraulique	faible	faible	Très grand	petit

III.1.2. Sur le système de mesure

III.1.2.1. Système de mesure

On distingue trois systèmes de mesure, que nous comparons dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.4. Les systèmes de mesure.

Systèmes de mesure	avantages	inconvénients	Domaine d'utilisation
Mesure directe	Elimination des erreurs de la chaîne cinématique	Coût, très élevée	Machine à longue course
Mesure indirect	Bas prix, montage plus facile, maintenance aisée.	Erreur sur la chaîne cinématique	Machine à faible course
Mesure mixte	Eviter d'avoir une précision élevée sur toute l'échelle de mesure	Montage difficile	Machines à petites et longues courses

III.1.2.2. Les systèmes de mesure incrémentaux, analogiques et semi-absolues

Tableau III.5. Les systèmes de mesures (incrémentaux, analogiques, semi-absolues).

Système de mesure	avantages	Inconvénients
Incrémentaux	Mesure les grands déplacements	Les erreurs s'accumulent, saleté sur la graduation, affectation possible de la

		précision
Analogiques	Fiables et à bon marché	Mesure uniquement les faibles déplacements
Semi-absolu	Très fiable, mesure de grandes et de faibles déplacements	Possibilité d'affectation de la précision.

III.1.3. Sur les caractéristiques des systèmes de commande

III.1.3.1. Entrée et sortie des données

Un large choix d'options qui peut proposer sur possibilité d'entrée et sortie des données.

Le tableau suivant nous permet de choisir entre les différentes possibilités.

Tableau III.6. Entrée et sortie des données.

Entrée/sortie des données	Avantages	Inconvénients	Taux d'utilisation
Commutateur à décade	Permet une mémorisation bien lisible des données.	Il nécessite un câblage derrière les commutateurs	En dégradation remarquable
Ruban perforé	Procédé classique permet une mémorisation, un nombre d'opération élevé	Nécessite des nouvelles perforations du ruban pour chaque rectification.	Utilisable
Clavier	Introduction et correction plus rapide	–	Le plus utilisé actuellement
Cassette	–	Pas fiable recherche	Moins utilisé

magnétique		du bloc plus longue	actuellement
Cassette statique à circuit intégrée	–	Très couteux	Utilisation spéciale
Bande magnétique	1 ^{er} procédé de mise en mémoire	Facilite l'affectation de la bande	Rarement utilisée.
Télétype	Indique une correction sur la bande perforée	–	Souvent utilisée.
ordinateur	Opération et forme plus complexe	–	En dégradation

III.1.3.2. Fonctions auxiliaires

Tableau III.7. Fonction auxiliaires.

Fonction auxiliaire	Rôle
Broche marche/Arrêt	Mise en marche de la broche avant démarrage des vitesses
Sélection de vitesses de broche par programme	Permet d'obtenir une vitesse de coupe optimale
Sélection des vitesses d'avance par programme	Permet d'obtenir une capacité d'enlèvement maximale
Correction des vitesses d'avance	Permet de modifier la vitesse d'avance programmée
Arrêt usinage	Permet l'arrêt d'usinage sans perdre l'information de position
Refroidissement marche/arrêt	Assure la mise en circuit de l'arrosage avant le début d'usinage

Changeurs d'outils	Permet la sélection des outils programmés
--------------------	---

Certaines machines sont munies d'un grand nombre de fonction auxiliaires qui essayent de faciliter la tâche de l'opérateur et du programmeur.

III.1.3.3. Cycles fixes

Certains systèmes de commande disposent dans leur mémoire des cycles fixes, ce qui permet de diminuer le temps de programmation et surtout si la programmation est manuelle.

III.1.3.4. Programme paramétrique

Certaines machines sont équipées d'un dispositif qui permet de préparer des programmes ayant les instructions propres à l'usinage désiré mais ne contenant pas les paramètres de l'outil utilisé ni des côtes de la pièce à usinée.

III.1.3.5. Programmation

La programmation peut se faire manuellement ou automatiquement.

Tableau III.8. Type de programmation.

Machine	Programmation	
	Automatique	Manuelle
Tour	=	=
<u>Fraiseuse</u>	I	0
Perceuse	0	I
Aléseuse-fraiseuse	I	0
Centre d'usinage	=	=

- ✓ = : taux d'utilisation est le même.
- ✓ I : taux d'utilisation plus grand ;
- ✓ 0 : taux d'utilisation est petit.

III.1.4. Sur l'entretien

L'entretien et la maintenance des MOCN est très nécessaire. Donc, avant de faire le choix de la machine, il faut vérifier les données suivantes :

- ✓ vérification des accès facile.
- ✓ bande disponible pour le contrôle des fonctions du système.
- ✓ cartes de vérification pour contrôler des affichages.
- ✓ et enfin, la garantie après vente.

En résumé, les MOCN doivent avoir des connexions de vérification à accès facile simplifiant le contrôle des fonctions les plus importantes.

Les signaux de lecteur de bande, de la mémoire intermédiaire de l'interpolateur et des servomécanismes d'entraînement doivent être accessibles.

III.2. Description de MOCN**III.2.1. Conception assistée par ordinateur (CAO)**

La conception assistée par ordinateur (CAO) comprend l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, de tester virtuellement à l'aide d'un ordinateur et des techniques de simulation numérique et de réaliser des produits manufacturés et les outils pour les fabriquer.

On confond souvent CAO et DAO (dessin assisté par ordinateur) : la CAO n'a pas pour fonction première l'édition du dessin. Il s'agit d'un outil informatique souvent lié à un métier, fonctionnant en langage dit objet, et permettant l'organisation virtuelle de fonctions techniques. Cela permet ensuite la simulation de comportement de l'objet conçu, l'édition éventuelle d'un plan ou d'un schéma étant automatique et accessoire. En DAO, un trait est un trait et le logiciel ne permet pas l'interprétation technique de l'ensemble.

III.2.1.1. SOLIDWORKS

SOLIDWORKS est un modèleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés.

Un dossier complet contenant l'ensemble des relatifs à un même système constitue une maquette numérique. De nombreux logiciels viennent compléter l'éditeur SOLIDWORKS. Des utilitaires orientés métiers (tôlerie, bois, BTP...), mais aussi des applications de simulation mécanique ou d'image de synthèse travaillent à partir des éléments de la maquette virtuelle.

III.2.1.2. Pourquoi s'abonner ?

Dans l'économie actuelle basée sur la compétitivité, il est indispensable de conserver un environnement de développement à jour pour demeurer compétitif, améliorer l'efficacité opérationnelle et équiper les développeurs des outils dont ils ont besoin. Le contrat de maintenance de SOLIDWORKS propose un moyen simple et flexible de maximiser votre investissement dans les solutions SOLIDWORKS.

III.2.2. Conception de la machine

III.2.2.1. Moteur pas à pas

Les moteurs pas-à-pas diffèrent, par leur mode de commande, des moteurs classiques. Les moteurs pas à pas permettent de transformer un signal électrique numérique en un mouvement angulaire. Chaque impulsion envoyée par le système de commande au module de puissance se traduit par la rotation d'un pas du moteur. La résolution angulaire d'un moteur pas à pas va de 4 à 400 pas.

Un moteur pas à pas est constitué d'un rotor interne contenant des aimants permanents et déplacé par un ensemble d'électroaimants placés dans le stator commutés par une électronique de puissance. L'alimentation ou non de chacun définit une position angulaire différente (l'enchaînement permet le mouvement). Les moteurs pas à pas simples ont un nombre limité de positions, mais les moteurs pas à pas à commande proportionnelle (alimentation variable des bobines) peuvent être extrêmement précis. On parle alors de « micro pas » puisque le moteur peut s'équilibrer entre deux pas.

Ces moteurs commandés par une électronique numérique sont une des formes les plus souples des systèmes de positionnement, en particulier dans les organes servocommandés numériquement : exemple, les moteurs de positionnement des têtes de lecture/écriture des disques durs d'ordinateur ont longtemps été positionnées par ce type de moteur, désormais trop lents pour cette application, ils ont été remplacés par des moteurs linéaires à impulsion beaucoup plus rapides.

On trouve trois types de moteurs pas à pas :

- ✓ Le moteur à réluctance variable ;
- ✓ Le moteur à aimants permanents ;
- ✓ Le moteur hybride, qui est une combinaison des deux technologies précédentes.

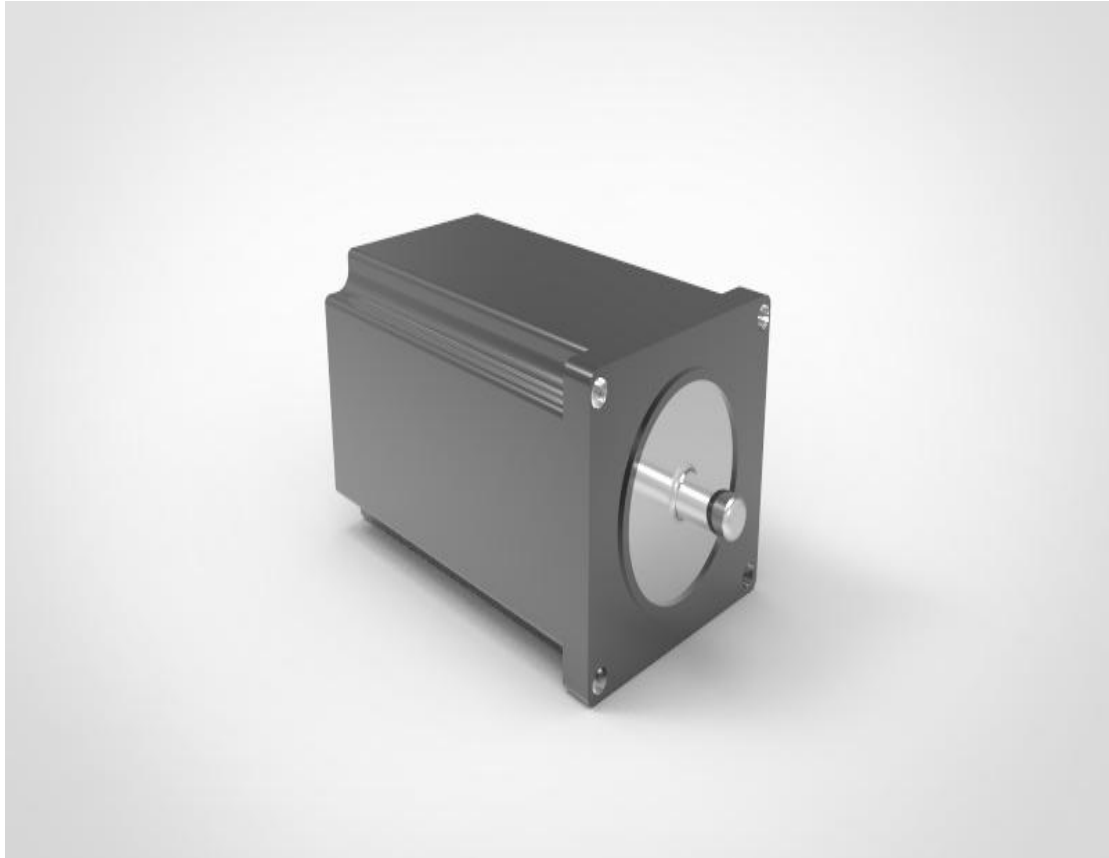


Figure III.1. Moteur pas à pas.

III.2.2.2. Palier

Les paliers sont des organes utilisés en construction mécanique pour supporter et guider, en rotation, des arbres de transmission.

Suivant l'usage désiré, ces paliers peuvent être :

- ✓ Lisses où les arbres qui reposent sur des coussinets sont soumis au frottement de glissement entre les surfaces en contact.
- ✓ À roulement où le contact s'effectue par l'intermédiaire de billes ou de rouleaux contenus dans des cages. On a là un phénomène de résistance au roulement (parfois appelé improprement « frottement de roulement ») qui permet une plus grande charge sur les paliers et une plus grande vitesse de rotation.

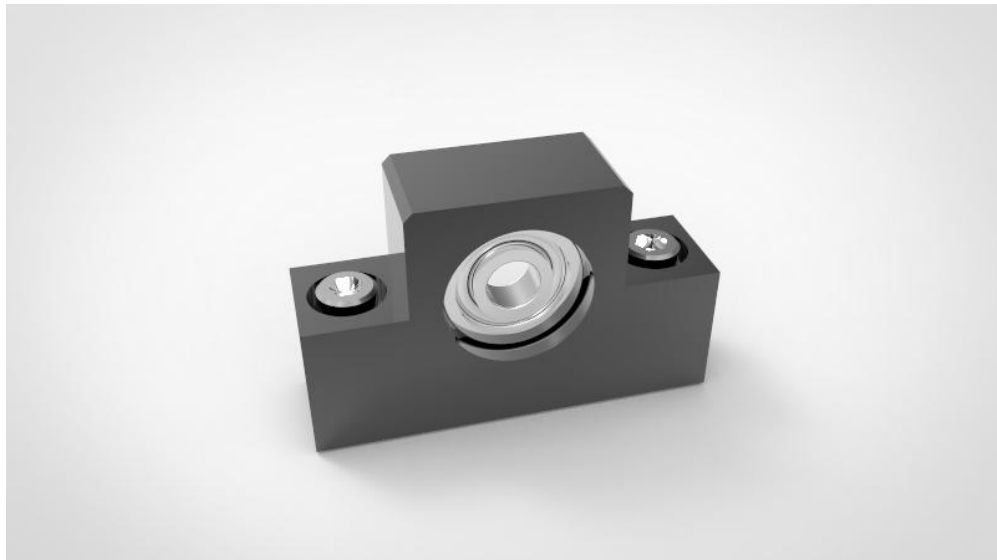


Figure III.2. Palier.

III.2.2.3. Accouplement

En mécanique, un accouplement ou joint de transmission est un dispositif de liaison entre deux arbres en rotation, permettant la transmission du couple.

Il permet éventuellement un certain désalignement (accouplement élastique, joint de cardan...), autorise des décalages angulaires (accouplement hydraulique...) et peut être temporairement inactif (embrayage, crabotage).

Un accouplement mécanique peut être un accouplement élastique, un accouplement à membranes, un accouplement à denture métallique ou encore un accouplement à soufflet.



Figure III.3. Accouplement.

III.2.2.4. Visse à bille

Une visse à billes est un mécanisme assurant la conversion d'un mouvement de rotation en un mouvement de translation (liaison hélicoïdale). C'est un équivalent du mécanisme de vis-écrou, où des billes sont intercalées entre les deux pièces.

La présence des billes permet de diminuer fortement le frottement qu'on rencontre dans un système vis-écrou simple. Les visse à billes s'imposent donc dans les cas :

- ✓ De transmission de puissance.
- ✓ De mouvements de précision, le remplacement du frottement par le roulement amenant la quasi disparition de l'usure des surfaces, et donc des jeux (mécanique).
- ✓ Où on recherche une réversibilité de la conversion rotation / translation.



Figure III.4. Visse à bille.

III.2.2.5. Glissière

Pièce destinée à guider le mouvement glissant d'une pièce mobile.



Figure III.5. Glissière.

III.2.2.6. Rail

Profilé de métal servant de guide à un mouvement de translation.

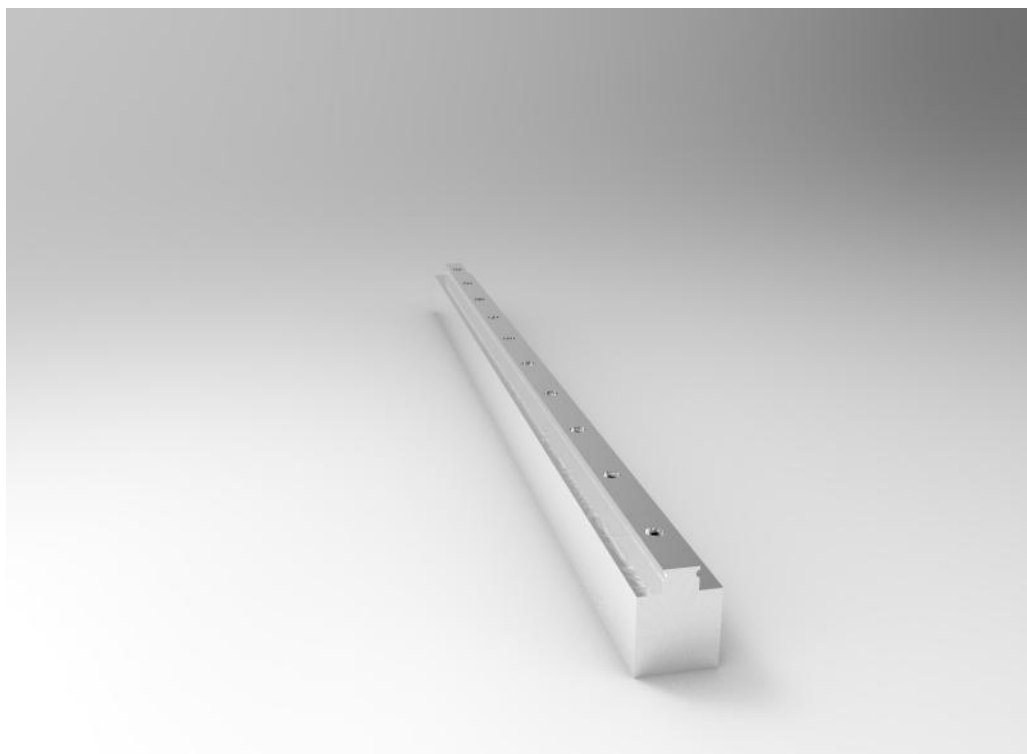


Figure III.6. Rail.

III.2.2.7. Axe d'une CNC

Un degré de liberté d'un organe de machine est appelé AXE si l'actionneur du mouvement est asservi en vitesse et position, et s'il peut être synchronisé avec un autre degré de liberté pour obtenir un déplacement qui n'est pas parallèle à une direction principale du système de coordonnées.

Il permet d'obtenir une position, par une instruction numérique, à la résolution du moyen de mesure près.

Un axe est constitué de la façon suivante :

- ✓ Un chariot mobile sur glissières.
- ✓ Un système de transmission vis-écrou (vis à billes).
- ✓ Un moteur et un réducteur.
- ✓ Un dispositif de mesure de vitesse.
- ✓ Un dispositif de mesure de position.



Figure III.7. Axe d'une CNC.

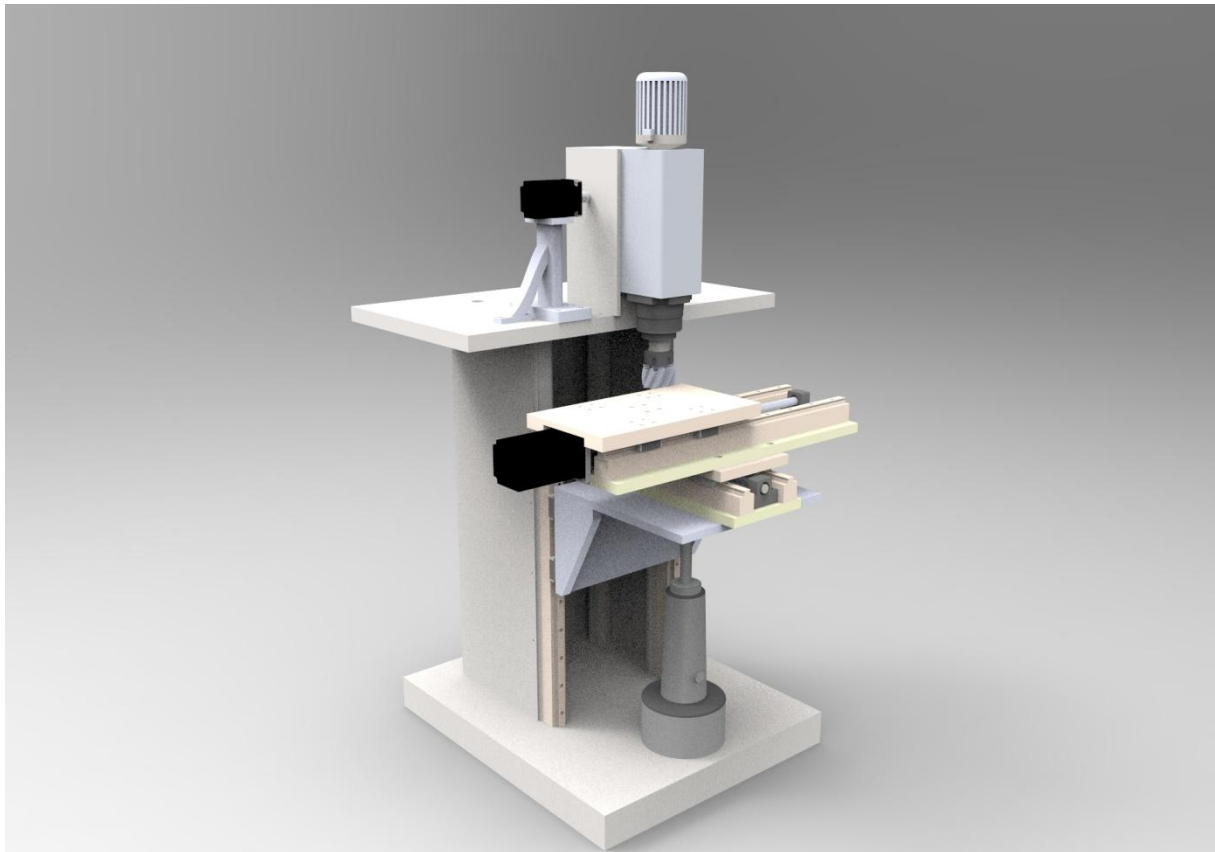


Figure III.8. Fraiseuse 3 axes (MOCN).

III.3. Paramètres fondamentales d'adaptation d'une commande numérique

Avant d'introduire une CN dans une entreprise, il est nécessaire à ce que les étapes suivantes soient respectées [12]

III.3.1. Paramètres relatifs à la pièce

Sélectionner les pièces qui ont l'avantage d'être usinées sur des MOCN, et pour les déterminer, le tableau suivant nous permet de les retrouver. [12]

Tableau III.9. Pièces justifiant le passage en commande numérique.

Pièces justifiant le passage en commande numérique.

- ✓ pièces impliquant des charges substantielles d'outillage par rapport aux coûts totaux de fabrication par les méthodes usuelles.
- ✓ pièces nécessitant de longs temps de réglage comparativement aux temps réels d'usinage sur machines courantes.

III.3.2. Aspect économique

Si l'on compare une machine conventionnelle à une CN, nous constaterons que leurs qualités physiques sont les mêmes c'est-à-dire : capacité, rigidité, vitesse de broche, ...) par contre ce qui fait leurs différences c'est l'aspect économique relatif à la CN qui regroupe plusieurs éléments : [12]

Tableau III.10. points d'amélioration et l'économie à atteindre.

Points d'amélioration	Economie à atteindre
1- Amélioration de la précision.	5% sur coût direct de fabrication.
2- Moins de réglages des outils par utilisation des compensations.	5% sur coût direct de fabrication.
3- Temps de changement d'outils plus courts (changement seulement lorsque l'usure se manifeste).	20% sur consommation d'outils.
4- Réduction des frais d'outils (emploi d'outil à plaquette amovibles et de plus d'outils normalisés.	25% sur coûts des outils.
5- Durée de vie des outils prolongée (vitesses de coupe et avances optimales).	30% sur coûts des outils.
6- Economie sur service achats (moins d'outils commandés, moins de paperasse).	5% sur coûts des outils.
7- Amélioration de la tenue des outils (meilleures conditions de travail de la machine).	20% d'augmentation de tenue des outils.
8- Diminution de la surface du magasin d'outils (simplification d'outillage).	50% d'économie de surface du magasin d'outils.
9- Entretien des outils simplifiés (plus	20% sur coûts d'affûtage.

d'affûtage ou presque).	
10- Allègement du travail à l'atelier d'outillage (besoin de moins d'outils).	25% de diminution de la surface de l'atelier d'outillage.
11- Diminution des coûts de montages (nécessite de moins de montages).	75% sur coûts des montages spécifiques.
12- Diminution des temps d'études d'outillage.	30% sur coûts d'étude des gammes d'outillage.
13- Possibilité de travailler par famille de pièces.	20% sur coûts d'étude des gammes d'outillage.
14- Economies sur études d'outillage (paperasserie, dessin, tirage de plans).	40% sur coûts d'exécution et de tirage.
15- Entretien machines simplifié (chaînes cinématiques plus courtes).	25% sur main d'œuvre d'entretien mécanique.
16- Inventaire de pièces mécaniques de rechange plus léger.	25% sur pièce de rechange.
17- Allègement du contrôle (machines plus précise, meilleure répétabilité).	35% du coût du contrôle.
18- Contrôle en CN plus précis que les méthodes manuelles.	80% sur temps de contrôle.
19- Réduction des temps de réglage.	80% sur coûts de réglage.
20- Réduction des rebuts de mise en route.	30% sur coût des rebuts.
21- Réduction des rebuts grâce à l'emploi d'un changeur d'outils.	20% sur coûts des rebuts.
22- Temps productif accru (passant à 80 ... 85% au lieu de 40 ... 60%).	10% sur total des charges indirectes.

23- Maitre des temps de production (facile à fixer).	10% l'augmentation de la production.
24- Economie par établissement et respect des normes de fabrication.	50% sur coûts des normes de fabrication.
25- Meilleure utilisation de l'énergie grâce à une production continue.	5% sur coût de l'énergie.
26- Diminution des inventaires.	5% sur valeur des stocks.
27- Economies sur allègement du magasinage des matériaux et sous-ensemble.	20% sur surface de magasinage.
28- Diminution des manutentions due à l'allègement des stocks.	5% sur coûts de manutention.
29- Economie de surface occupée du fait de la diminution du nombre de machines nécessaires.	Meilleure utilisation de la surface couverte.
30- Economie de maîtrise.	Personnel réduit.
31- Diminution des frais marginaux grâce à l'amélioration des temps productifs.	25% de réduction des fais marginaux.
32- Possibilités de fabrication de prototypes dans les séries.	50% sur coûts des prototypes.
33- Disponibilité de pièces prototypes.	Argument de vente important.
34- Facilité pour le contre maître de s'attacher à l'activité des hommes plutôt qu'au fonctionnement des machines.	Amélioration générale de la production.
35- Réduction de la main-d'œuvre directe.	Economies chiffrables directement à la pièce et non plus au temps de cycle.

36- Souplesse de planification.	Amélioration de service clients.
37- Economies sur planification.	Souplesse accrue.
38- Facilité de réponse aux modifications techniques.	Simple changement de programme.
39- Possibilité d'utiliser des matériaux divers.	Moins de pertes de matière première.
40- Possibilité de fabriquer des pièces plus complexes.	Les possibilités de la machine simplifient l'outillage.
41- Plus de souplesse de conception aux études.	On peut tirer tout le parti des avantages de la CN.
42- Possibilités de passer aux conceptions futures sans coûts excessifs d'outils.	Par simple changement de programme, on répond aux changements de plans.
43- Réduction des coûts et amélioration de la précision des estimations.	Les estimations peuvent se faire à partir d'un passage à vide des rubans programmes.
44- l'expérience introduite dans les rubans programmes reste malgré les changements de personnels.	Efficacité des études d'outillage et de production accrue de 15%.

III.4. Organisation de la méthodologie d'introduction de commande numérique

III.4.1. Qu'est-ce qu'Arduino?

C'est une plate-forme open-source d'électronique programmée qui est basée sur une simple carte à microcontrôleur (de la famille AVR), et un logiciel, véritable environnement de développement intégré, pour écrire, compiler et transférer le programme vers la carte à microcontrôleur.

Arduino peut être utilisé pour développer des objets interactifs, pouvant recevoir des

entrées d'une grande variété d'interrupteurs ou de capteurs, et pouvant contrôler une grande variété de lumières, moteurs ou toutes autres sorties matérielles. Les projets Arduino peuvent être autonomes, ou bien ils peuvent communiquer avec des logiciels tournant sur votre ordinateur (tels que Flash, Processing ou MaxMSP). Les cartes électroniques peuvent être fabriquées manuellement ou bien être achetées pré-assemblées ; le logiciel de développement open-source peut être téléchargé gratuitement.

Le langage de programmation Arduino est une implémentation de Wiring, une plateforme de développement similaire, qui est basée sur l'environnement multimédia de programmation processing. [14]

III.4.1.1. Qu'est-ce qu'un microcontrôleur ?

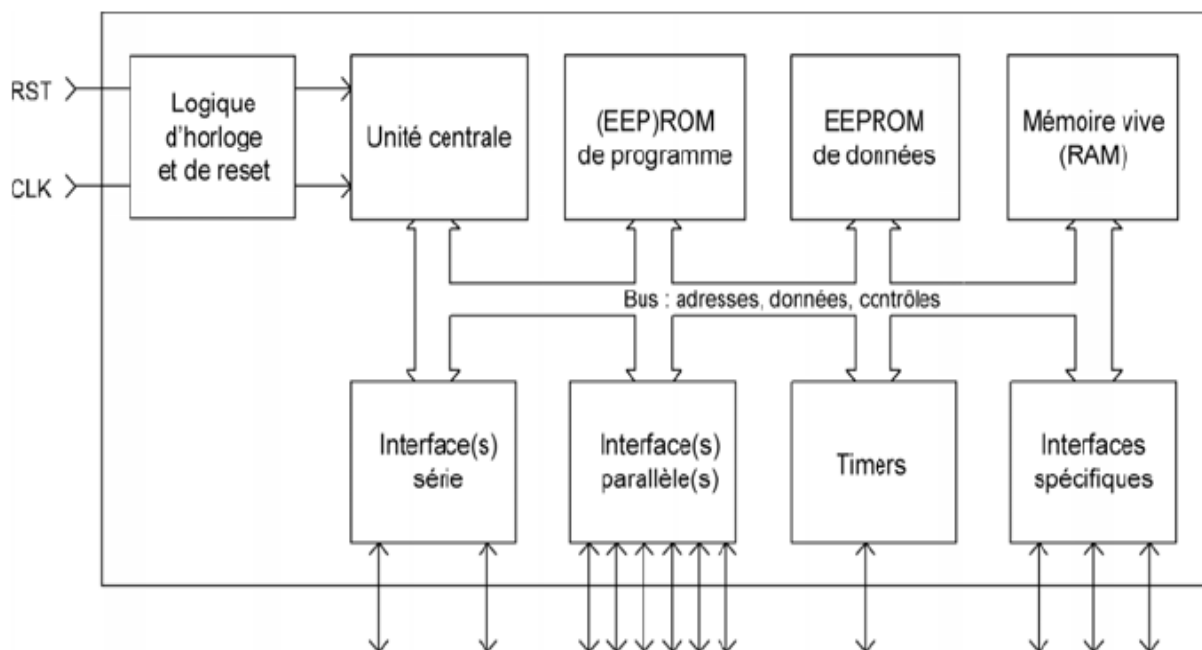


Figure III.9. Schéma simplifié du contenu type d'un microcontrôleur.

Pour faire simple, un microcontrôleur, appelé à tort microprocesseur par nombre de personnes mal informées, voire même par certains journalistes « scientifiques », est en fait l'équivalent d'un petit ordinateur, tel votre PC par exemple, contenu dans un seul boîtier de circuit intégré à plus ou moins grand nombre de pattes. Il contient ainsi une unité centrale – l'équivalent du microprocesseur qui équipe votre PC – de la mémoire vive, de la mémoire morte, des interfaces diverses pour communiquer avec le monde extérieur et toute la circuiterie électronique et logique nécessaire pour faire fonctionner tout cela ensemble.

La figure (**Figure III.9.**) présente ainsi le contenu, très simplifié, mais largement suffisant pour l'instant, d'un microcontrôleur. On y constate que tous les éléments contenus dans le boîtier sont reliés entre eux par ce qui s'appelle un bus, qui est en fait un ensemble de connexions véhiculant les adresses, les données et les signaux de contrôle échangés entre ces différents sous-ensembles. Pour ce qui est de ces sous-ensembles internes, leur nombre et leurs types sont variables et dépendent du microcontrôleur choisi. L'unité centrale est évidemment toujours présente puisque c'est elle le cerveau du microcontrôleur. La mémoire également puisqu'elle est indispensable pour contenir le programme que va exécuter le circuit, mais son type et sa taille varient énormément d'un circuit à un autre ; nous en reparlerons lorsque nous évoquerons les différentes versions d'Arduino. Pour ce qui est des sous-ensembles d'interface, leur nombre et leurs types varient là aussi selon le microcontrôleur choisi, mais l'on rencontre quasiment toujours aujourd'hui un ou plusieurs timers ou compteurs, des entrées/sorties parallèles, des entrées/sorties séries et des convertisseurs analogiques/numériques et numériques/ analogiques. Si ces termes vous sont totalement ou partiellement inconnus, ne vous inquiétez pas, nous y reviendrons dans la suite de cet ouvrage. Compte tenu de l'intégration de tous ces éléments dans un seul et unique boîtier de circuit intégré, il ne faut que très peu de composants électroniques externes autour d'un microcontrôleur pour le faire fonctionner. Nous allons en dresser la liste rapidement.

❖ **L'alimentation**

L'alimentation est évidemment le premier élément indispensable. Tous les microcontrôleurs actuels fonctionnent sous une tension unique qui varie, selon les types de circuits, de 1,8 à 6 volts environ, avec une prédilection encore aujourd'hui pour la tension de 5 volts.

Cette tension est en effet celle qui est utilisée par tous les circuits logiques de la famille dite TTL ; circuits qui ont été les premiers circuits logiques très largement utilisés et qui sont encore aujourd'hui très présents dans la majorité des appareils électroniques, même si on se dirige peu à peu vers des versions fonctionnant sous une tension de 3,3 volts.

De ce fait, lorsque l'on parle encore aujourd'hui de circuits logiques TTL ou compatibles TTL, cela sous-entend une alimentation sous 5 volts et, comme nous le verrons dans la suite de cet ouvrage, cela a également des implications sur les niveaux électriques admis en entrée et générés en sortie par ces circuits. Quoi qu'il en soit, et quelle que soit sa valeur, la tension qui alimente notre microcontrôleur doit être stabilisée afin d'assurer un fonctionnement correct de celui-ci.

❖ L'horloge

Le deuxième élément essentiel au fonctionnement d'un microcontrôleur est l'horloge. Un microcontrôleur est en effet un circuit logique séquentiel, c'est-à-dire qu'il fonctionne au rythme d'un signal rectangulaire, appelé horloge, qui cadence toute sa circuiterie interne. La fréquence de cette horloge dépend du type de microcontrôleur utilisé et peut varier de quelques kilohertz (kHz) à plusieurs dizaines de megahertz (MHz) (dans un PC ou un Mac on dépasse même le gigahertz (GHz)). Plus la fréquence d'horloge est élevée, plus le microcontrôleur est rapide mais, en contrepartie, plus il consomme d'énergie.

Même s'il n'est pas indispensable que la fréquence de cette horloge soit parfaitement stable, c'est cependant généralement le cas car rares sont les applications qui n'ont pas besoin de mesurer du temps ou de générer des signaux aux chronogrammes précis, et cela n'est possible que si l'horloge qui pilote le microcontrôleur est elle-même stable. De ce fait, elle est en général pilotée par un quartz ou au moyen d'un résonateur céramique, seuls composants électroniques capables de générer des signaux à une fréquence stable et précise.

❖ Le circuit de reset

Tout comme votre PC, un microcontrôleur exécute en permanence un programme et si, lorsque ce programme est au point et ne comporte plus de « bug » (oui, je sais, ce n'est jamais le cas sur votre PC...) il se déroule en continu tant que l'application est alimentée ; en phase de développement il est fréquent qu'il « se plante ». Pour sortir d'une telle situation, il est bien sûr possible de couper l'alimentation puis de la rétablir, ce qui fait redémarrer le programme au début. En effet, le microcontrôleur dispose d'un circuit de reset automatique à la mise sous tension qui se charge donc d'une telle opération.

Mais il est nettement plus confortable de pouvoir réaliser cette opération par simple appui sur un poussoir, et c'est là le rôle joué par le circuit de reset manuel. Lorsque l'on actionne le poussoir de reset, et quel que soit l'état dans lequel se trouve le microcontrôleur à ce moment-là, il recommence l'exécution du programme contenu dans sa mémoire à son début. S'il était « planté » il quitte donc cet état peu recommandable et reprend l'exécution du programme. S'il ne l'était pas, le poussoir de reset a bien évidemment le même effet.

❖ La programmation

Un microcontrôleur, nous l'avons dit, exécute un programme. Ce programme est contenu dans une de ses mémoires, qui peut être de la mémoire morte ou ROM, c'est-à-dire

de la mémoire programmée une fois pour toutes par le fabricant du circuit, ou de la mémoire Flash, c'est-à-dire de la mémoire que l'utilisateur peut programmer et effacer tout à loisir.

Les microcontrôleurs à mémoire morte ne sont pas intéressants pour les développeurs d'applications car le programme qu'ils contiennent est figé une fois pour toutes lors de leur fabrication. On les rencontre donc seulement dans les appareils produits en très grande série au plan industriel. Le calculateur qui gère l'injection électronique d'un moteur de voiture est ainsi souvent un circuit de ce type car, une fois que son programme a été mis au point par le constructeur, il n'a plus besoin d'être modifié.

Les microcontrôleurs à mémoire Flash par contre représentent la solution idéale pour les développeurs d'applications. Cette mémoire, identique dans son principe à celle qui se trouve dans les cartes mémoires d'appareils photos ou bien encore dans les clés USB, peut en effet être programmée et effacée très simplement et, en outre, elle conserve son contenu lorsqu'elle n'est pas alimentée, ce qui est indispensable si l'on ne veut pas que notre microcontrôleur « oublie » son programme à chaque fois qu'on l'éteint !

Pour programmer cette mémoire, certains microcontrôleurs nécessitent d'être enlevés de leur application pour être placés sur un programmeur spécialement prévu à cet effet. Il s'agit là de la programmation classique ou traditionnelle. D'autres circuits, plus récents et plus performants, supportent ce que l'on appelle la programmation « en circuit » ou ISP (*In System Programming*) ou bien encore ICSP (*In Circuit Serial Programming*) qui permet de les programmer, via une liaison spéciale, même lorsqu'ils restent en place sur leur application définitive. C'est évidemment beaucoup plus confortable que la programmation classique évoquée précédemment.

III.4.2. Les différentes versions d'Arduino

Maintenant que vous savez ce qu'est un microcontrôleur et ce qu'il faut pour pouvoir le faire fonctionner, nous pouvons passer à la présentation de l'objet de ce livre : l'Arduino ou, plus exactement, les différentes versions d'Arduino. Les concepteurs de l'Arduino ont fixé leur choix sur les microcontrôleurs fabriqués par la société Atmel, et plus précisément sur la famille AVR de ce fabricant. Même si l'on peut discuter pendant des heures de ce choix et des mérites comparés de ces circuits par rapport à ceux de fabricants concurrents ; les microcontrôleurs AVR représentent aujourd'hui un excellent compromis prix/puissance et, même s'il ne s'agit que de microcontrôleurs à unité centrale 8 bits, ils permettent de développer des applications très intéressantes.

Le projet Arduino n'étant pas né en un jour, de nombreuses versions de cartes ont existé ou existent encore à ce jour mais, actuellement, on peut raisonnablement se focaliser sur les deux versions de base les plus récentes, tout en sachant qu'elles sont toutes « *upward compatibles* » comme disent les Américains, c'est-à-dire encore qu'elles présentent une compatibilité ascendante. Ainsi, une application développée pour une « vieille » carte Arduino Diecimila fonctionnera sans modification sur une récente Arduino Uno Révision 3 ou bien encore sur une Arduino Duemilanove. L'inverse, par contre, ne sera pas toujours vrai car les cartes récentes utilisent des microcontrôleurs disposant de mémoires de tailles plus importantes que leurs prédécesseurs.

À ce stade de l'ouvrage, on peut considérer aujourd'hui qu'il n'existe plus que deux versions majeures d'Arduino : l'Arduino Uno qui en est à sa Révision 3 au moment où ces lignes sont écrites, et l'Arduino Mega 2560 d'autre part, qui est une version compatible l'Arduino Uno mais disposant de ressources d'entrées/sorties beaucoup plus nombreuses. [14]



Figure III.10. Carte arduino Mega2560.

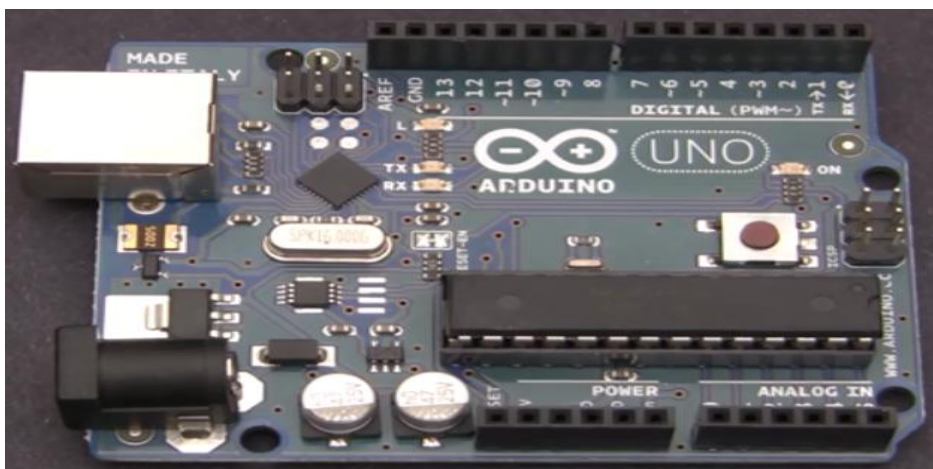


Figure III.11. Carte arduino Uno.

Tableau III.11. Comparatif entre Arduino Uno et Mega2560.

Arduino	Uno	Mega2560
Processeur	ATmega328P	ATmega2560
Flash (KB)	32	256
EEPROM (KB)	1	4
SRAM (KB)	2	8
Broches d'E/S numériques	14 dont 6 PWM	54 dont 14 PWM
Broches entrées analogiques	6	16
Type d'interface USB	ATmega8U2	ATmega8U2
Dimensions (mm)	68,6 x 53,3	101,6 x 53,3

III.4.3. Pourquoi Arduino ?

- ✓ Pas cher : les cartes Arduino sont relativement peu coûteuses comparativement aux autres plate-formes. La moins chère des versions du module Arduino peut être assemblée à la main, et même les cartes Arduino pré-assemblées coûtent moins de 25 Euros (microcontrôleur inclus...) !!!
- ✓ Multi-plateformes : le logiciel Arduino, écrit en Java, tourne sous les systèmes d'exploitation Windows, Macintosh et Linux. La plupart des systèmes à microcontrôleurs sont limités à Windows.
- ✓ Un environnement de programmation clair et simple : l'environnement de programmation Arduino (= le logiciel Arduino) est facile à utiliser pour les débutants, tout en étant assez flexible pour que les utilisateurs avancés puisse en tirer profit également.
- ✓ Logiciel Open Source et extensible : le logiciel Arduino et le langage Arduino sont publiés sous licence open source, disponible pour être complété par des programmeurs expérimentés.
- ✓ Matériel Open source et extensible : les cartes Arduino sont basées sur les

microcontrôleurs Atmel ATMEGA8, ATMEGA168, ATMEGA 328, etc... Les schémas des modules sont publiés sous une licence Creative Commons, et les concepteurs de circuits expérimentés peuvent réaliser leur propre version des cartes Arduino, en les complétant et en les améliorant. Même les utilisateurs relativement inexpérimentés peuvent fabriquer la version sur plaque d'essai de la carte Arduino, dans le but de comprendre comment elle fonctionne et pour économiser de l'argent.

III.4.4. Programmation / initialisation de l'interface

III.4.4.1. Arduino

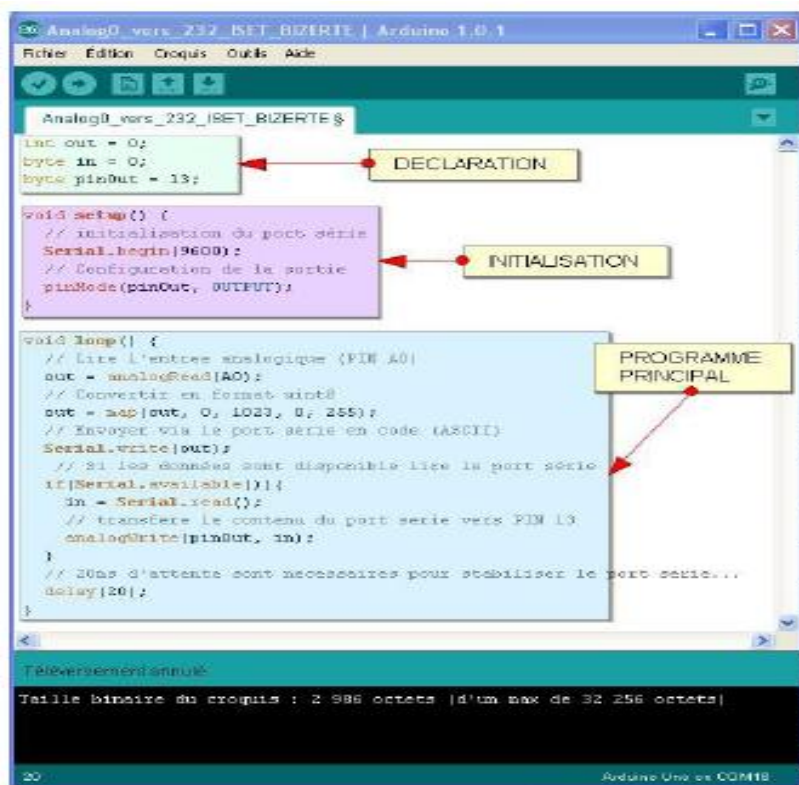


Figure III.12. L'interface d'Arduino.

✚ Pré-requis.

- ✓ Avoir téléchargé et dézippé le logiciel Arduino.
- ✓ La platine est reconnue par Windows grâce au pilote (voir dossier '**Arduino-1.0.1\drivers**') et un périphérique '*Port COM*' est rajouté avec le nom '*Arduino MEGA 2560*'

1) Lancez l'environnement de programmation Arduino en cliquant sur le fichier 'arduino.exe'



2) Cliquez sur « Fichier » puis « Ouvrir » puis sélectionnez SHELL_MEGA24.INO que vous aurez téléchargé et dézippé depuis :

http://www.techno-zone-51.fr/attachment.php?id_attachment=21

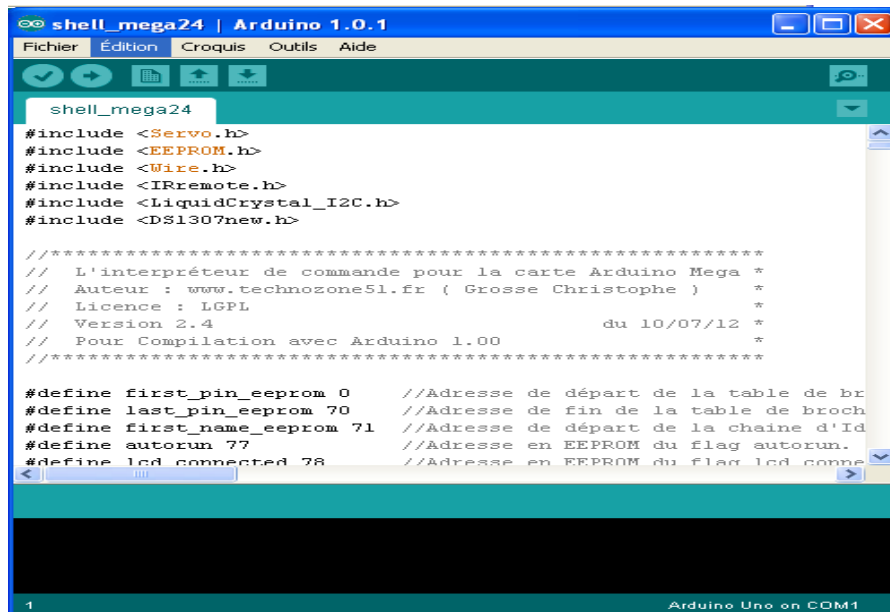


Figure III.13. SHELL_MEGA24.

3) Cliquez sur « Outils » puis « Type de carte » puis sélectionnez la carte dont vous disposez.

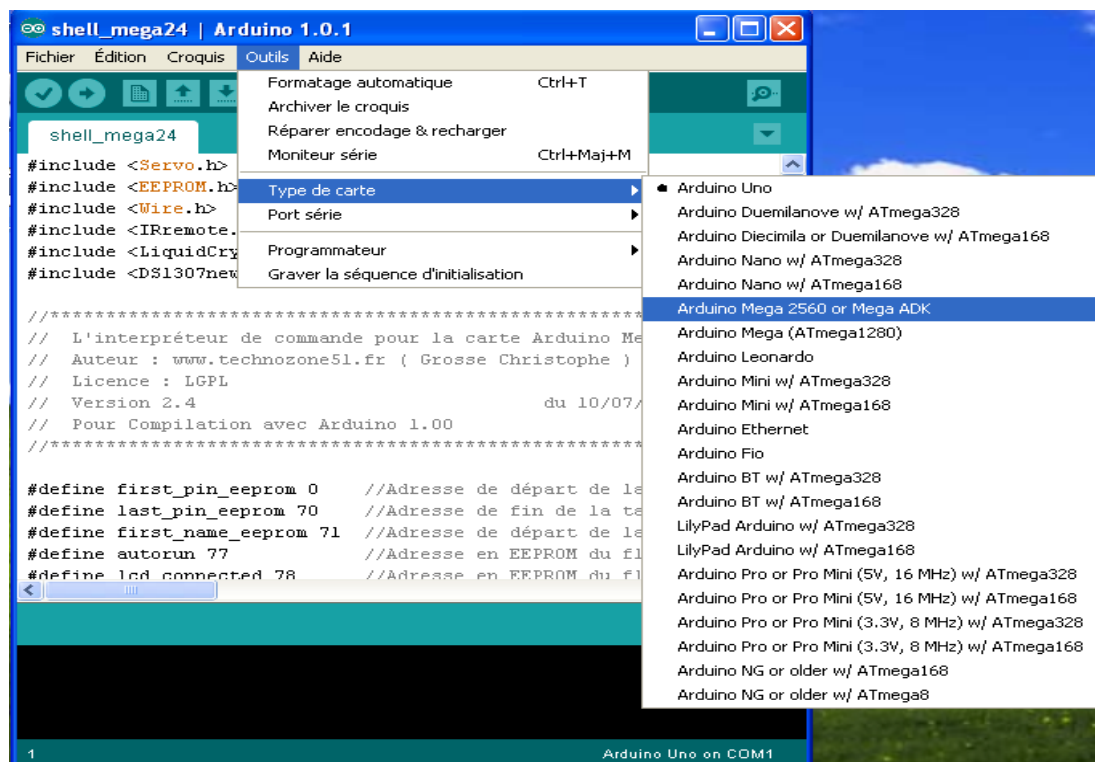


Figure III.14. La sélection de type de carte.

4) Cliquez sur « Outils » puis « Port Série» puis sélectionnez le port COM sur lequel est connectée votre carte (si plusieurs port COM vous sont proposés, il faudra les tester un à un jusqu'à trouver lequel fonctionne ou vérifier dans le 'Gestionnaire de périphériques').

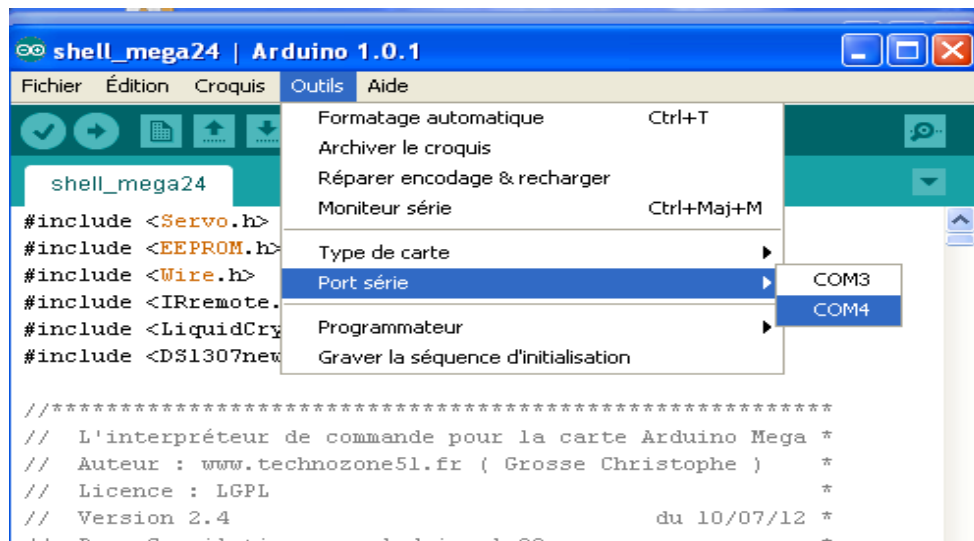

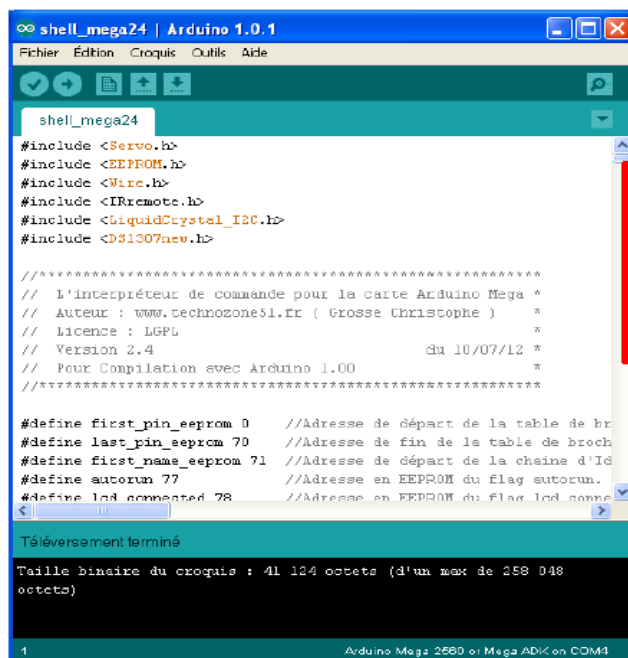


Figure III.15. La sélection de type de port.

Cliquer sur l'icône  pour téléverser le programme dans la carte. Le programme est tout d'abord compilé puis il est transféré dans la carte. Normalement le message « Done uploading» indique que tout s'est bien passé. En cas de message d'erreur, retentez l'upload en ayant pris soin de choisir un autre port COM...



**VOTRE CARTE EST
MAINTENANT PRETE POUR
RECEVOIR LES SHIELD
EASYCON**

Figure III.16. La carte est prête.

III.4.4.2. Universal G-code sender



Figure III.17. L'interface de logiciel Universal G-code sender.

III.5. Influence de l'introduction de la CN sur l'entreprise

L'introduction de la CN influe sur l'entreprise de la façon suivante : [12] [13]

III.5.1. Aspect technique

L'adaptation d'une CN dans une entreprise quelconque exige des modifications et des corrections au niveau de tous les services constituant cette entreprise.

III.5.1.1. Bureau d'études

Le personnel du bureau d'étude, qui a subi une formation au préalable qui le rend capable à utiliser la CN, doit recevoir des informations détaillées sur les machines à CN et l'outillage disponible par le biais des différents catalogues.

Comme il doit recevoir aussi toutes les instructions avec la plus grande précision concernant le système de cotation à utiliser pour simplifier la programmation.

III.5.1.2. Bureau des méthodes

Les bureaux des méthodes en général chargés de la programmation imposent à l'atelier une discipline plus rigoureuse dans les temps de fabrication en obligeant le personnel du bureau des méthodes à ne plus penser en conventionnel car c'est le problème le plus fréquemment rencontrés dans les entreprises utilisant des CN.

III.5.1.3. Sur la fabrication

Un planning détaillé de toutes les phases de production est nécessaire les changements principaux concernant :

❖ Implantation des ateliers

L'adaptation des MOCN dans la fabrication pose deux types de problèmes très importants :

- ✓ Problèmes directs concernant la localisation des machines à CN (regroupement de toutes les CN dans une même section).
- ✓ Problèmes indirectes : regroupement les incidences des lots de pièces en usinage sur les surfaces de stockage intermédiaires.

❖ Circulation des pièces

Ce problème est étroitement lié au précédent l'influence la plus nette sur la circulation des pièces réside dans l'emploi des centres des usinages ceux-ci, effectuant sur chaque pièce des opérations multiples, précédemment réalisées sur plusieurs machines différentes réduisent évidemment de façon plus au moins importante les trajets de circulation des pièces dans les ateliers.

❖ Réglage

La CN nécessite la mise sur pied d'un groupe de préréglage d'outils et aussi préparer des dispositifs de préréglage d'outils universels et également des dispositifs de bridage (non pas des dispositifs particuliers pour chaque machine).

❖ Montage d'usinage

Dans de nombreux cas, l'utilisation de la CN permet de constituer des standards très complets de brides, cales, ... aussi que des standards d'outils d'usage général plus aisément que ne le permet l'utilisation des montages d'usinages sur machines classiques.

❖ Le contrôle

Mettre au point des nouveaux programmes pour contrôler la première pièce.

❖ Stockage

La possibilité de réduire l'importance des lots de pièces permet d'envisager un approvisionnement beaucoup plus fluide des matières premières donc de réduire de façon importante les déplacements de stockage.

❖ Maintenance

Pour la maintenance des MOCN, il serait nécessaire de former un personnel capable de détecter rapidement la panne chaque fois qu'il y a lieu et d'y remédier.

III.5.2. Aspect social

Lorsqu'on introduit la CN dans une entreprise, nécessite une évolution des structures et des tâches. Donc une action de formation complémentaire s'impose obligatoirement sur des membres de service (programmeur et opérateurs). D'une façon générale, l'introduction de la CN permet des emplois d'un niveau intéressant à un personnel n'ayant pas grande connaissance.

III.5.3. Aspect économique**III.5.3.1. Réduction des temps de lancement**

La commande numérique a l'avantage de faire disparaître la notion de série minimum économique tout en laissant cependant subsister une série maximum au delà de laquelle l'emploi de matériel automatiques classiques devient la seule solution économiquement viable.

III.5.3.2. Réduction des temps de fabrication

La CN réduit énormément les temps d'usinage qui lui permettent d'augmenter sensiblement la productivité.

III.5.3.3. Réduction des temps de manipulation

Plus une pièce est complexe, plus elle demande d'opérations et plus de machines nécessaires est élevé lorsque l'on utilise la méthode d'usinage habituelle. Donc la CN permet de réduire les temps de manipulation parce qu'on peut éliminer par certain nombre de phase ou de sous-phase.

Tableau III.12. % de réduction des temps de manipulation.

Machines-outils	% de réduction des temps de manipulation
Alésage	20%
Tournage	22%

Perçage	25%
Fraisage	27%
Poinçonnage	39%
Centre d'usinage	51%

III.5.3.4. Réduction des rebuts

Le problème des rebuts se trouve posé de façon fondamentalement différente par rapport à l'usinage classique dans le cas de l'usinage en CN car la précision de celles-ci et la diminution des facteurs d'erreurs humains fait que les rebuts sont diminués dans une proportion notable.

III.5.3.5. Diminution de temps de contrôle

Le plus souvent, l'inspection de la première pièce est suffisante une fois que la machine a fait preuve de sa fiabilité et que la bande a été contrôlée. Donc en général, les temps de contrôle sont réduits.

Tableau III.13. % de Diminution de temps de contrôle.

Type	% de Diminution du temps de contrôle
Tournage	32%
Alésage	33%
Perçage	37%
Fraisage	38%
Poinçonnage	43%
Centre d'usinage	44%

III.5.3.6. Diminution des en-cours

Toutes pièces déposées sur le plancher et en attente entre deux machines représentent :

La CN en réduisant les temps de lancement, en donnant une meilleure utilisation des machines en augmentant la proportion du temps réel de coupe permet de réduire les en-cours.

Tableau III.14. % de réduction des en-cours.

Machines-outils	% de réduction des en-cours
Tournage	22%
Alésage	19%
Perçage	17%
Fraisage	20%
Poinçonnage	21%
Centre d'usinage	32%

III.5.3.7. Diminution du travail d'assemblage

La meilleure précision des pièces usinées, le bon contrôle des pièces ainsi que leurs meilleures répétitivités facilitent le travail du montage.

III.5.3.8. Facilité de modification de dessin

La CN permet de modifier facilement le dessin donc des modifications simples peuvent être obtenues en réalisant un nouveau ruban qui peut être produit en quelques minutes ou en quelques heures.

Conclusion

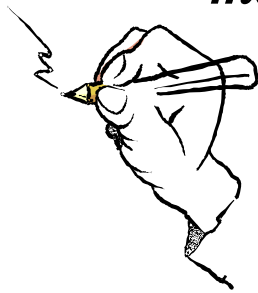
Dans ce chapitre nous avons traité le problème de conception de la machine outil à commande numérique à l'aide d'un logiciel de CAO dénommé SOLIDWORKS.

On a cité les caractéristiques techniques de sélection des MOCN, ainsi que les paramètres fondamentaux d'adaptation d'une commande numérique. Comme on a aussi donné quelques généralités sur l'unité de commande Arduino le logiciel Grbl code.

Finalement, on a déterminé l'influence de l'introduction de la CN sur l'entreprise.

***Chapitre IV. Dimensionnement des organes de la
machine.....82-105***

Page



IV.1. Cahier des charges

Un chariot de machine-outil à commande numérique doit être entraîné horizontalement par une vis à billes couplée directement à un moteur pas à pas hybride.

La masse totale en translation est évaluée à $m=40$ kg (35 kg table et 5kg pour la pièce). Elle est solidaire de l'écrou appelé encore noix. Celui-ci doit supporter au cours de l'usinage une force de travail F_c .

On choisit un incrément de positionnement de $20 \mu\text{m}$.

Durant les cycles de fonctionnement de la machine-outil, on choisit une vitesse de déplacement $V_a = 2 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ avec une force d'usinage F_c .

La distance totale à parcourir doit s'effectuer dans un temps estimé à 5 s.

IV.2. Dimensionnement de la broche

IV.2.1. Effort de coupe

Le calcul de l'effort de coupe et de la puissance dépend de l'application (tournage, fraisage, perçage etc.), de la matière à usiner et les paramètres d'usinage.

Dans le cas d'une opération de fraisage d'une pièce en acier alliés de résistance mécanique 900 N/mm^2 , avec un outil en ARS (acier rapide supérieur) de diamètre $D=100$ mm comportant 6 dents, les paramètres d'usinages sont :

- ✓ avance par dent : $f_z=0.1$ mm
- ✓ profondeur de passe : $a_p=5$ mm
- ✓ largeur à usiner : $a_r=80$ mm
- ✓ vitesse de coupe : $V_c=16$ m/min
- ✓ angle de coupe : $\gamma =0^\circ$

L'effort de coupe est donné par $F_c = K_S \times a_r \times a_p$ [15] (IV.1).

Avec K_S est l'effort spécifique de coupe par unité de surface (N/mm^2).

Le (tableau IV.1.) donne les valeurs de K_S en fonction de la matière à usiner et du type d'outil. Pour tenir compte des autres facteurs tels que l'avance par dent, la largeur à usiner, on doit le corriger par un coefficient f_h tel que [16] :

$$K_s(\text{corrigé}) = K_s \times f_h \tag{IV.2.}$$

Pour une pièce en aciers alliés ($R_m=900 \text{ N/mm}^2$) et une fraise en ARS. On trouve $K_s = 3500 \text{ N/mm}^2$. [17]

Tableau IV.1. Efforts spécifique de coupe en fonction du matériau usiné. [17]

Matériaux usinés R_m en N/mm^2	Efforts spécifiques de coupe k_s en N/mm^2		Vitesses de coupe v_c en m/min		Avances par dent s/d (valeurs moy.)	
	Outils en carbures métalliques	Outils en ARS	Outils en carbures métalliques	Outils en ARS	Outils en carbures métalliques	Outils en ARS
<i>Aciers non alliés</i>			$T \approx 40 \text{ min}$	$T \approx 60 \text{ min}$		
XC15, $R_m \approx 400$	2 100-2 300	2 400	100-160	28-36	0,3	0,1
XC35, $R_m \approx 550$	2 700-2 800	2 900	100-140	26-34	0,25	0,1
XC70, $R_m \approx 800$	3 000-3 200	3 300	80-120	20-28	0,25	0,1
<i>Aciers alliés</i>						
$R_m \approx 650$	2 900-3 100	3 200	80-120	24-30	0,15	0,09
$R_m \approx 900$	3 200-3 400	3 500	60-80	14-18	0,15	0,09
$R_m \approx 1 100$	3 500-3 700	3 800	40-70	8-14	0,15	0,09
<i>Fonte malléable</i>						
ferritique HB180	1 800-1 900	2 000	60-100	20-28	0,22	0,12
perlitique HP200	2 100-2 300	2 400	40-60	16-20	0,16	0,1
<i>Alliages légers</i>	800-900	900	250-600	60-100	0,16	0,12
<i>Bronzes</i>	1 800-2 000	2 100	80-140	30-40	0,18	0,1

Le coefficient f_h dépend de l'épaisseur moyenne du copeau h_m . Celle-ci est fonction du rapport a_r/D (a_r et D désignent respectivement la largeur à usiner et le diamètre de la fraise) et de l'avance par dent f_z . Le tableau 2 donne les valeurs de h_m .

Pour $a_r/D = 80/100 = 8/10$ et $f_z = 0.1 \text{ mm/dent}$, on a : $h_m = 0.08 \text{ mm}$

Tableau IV.2. Epaisseur moyenne du copeau en fonction du rapport a_r/D . [18]

a_r/D	avance par dent : f_z								
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
1/10	0,05	0,1	0,19	0,29	0,38	0,48	0,58	0,77	0,96
2/10	0,05	0,1	0,19	0,28	0,38	0,48	0,57	0,76	0,95
3/10	0,05	0,09	0,19	0,28	0,38	0,47	0,56	0,75	0,94
4/10	0,05	0,09	0,19	0,28	0,37	0,47	0,56	0,74	0,93
5/10	0,05	0,09	0,18	0,28	0,37	0,46	0,55	0,74	0,92
6/10	0,04	0,09	0,18	0,27	0,36	0,44	0,53	0,71	0,89
7/10	0,04	0,09	0,17	0,26	0,35	0,43	0,52	0,70	0,87
8/10	0,04	0,08	0,16	0,25	0,33	0,41	0,49	0,66	0,82
9/10	0,04	0,08	0,15	0,23	0,31	0,39	0,46	0,62	0,77
1/1	0,03	0,07	0,12	0,18	0,24	0,31	0,37	0,49	0,61

Le coefficient de correction f_h de K_S est donné par la (figure IV.1).

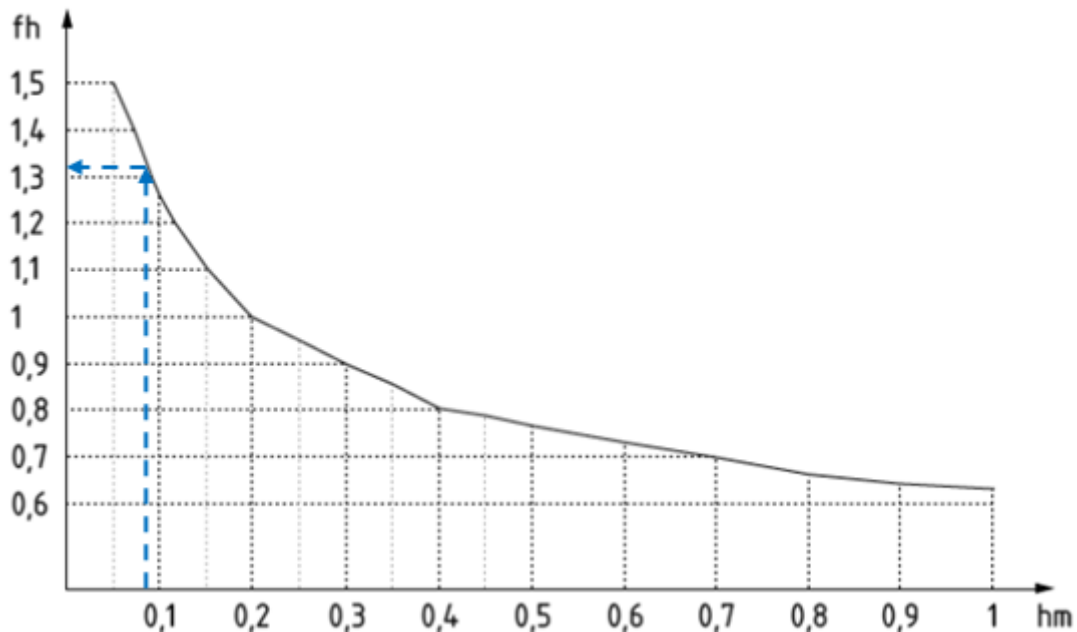


Figure IV.1. Facteur de correction f_h en fonction de h_m . [16]

Pour $h_m=0.08$ mm, on lit : $f_h=1.32$

Par conséquent : K_S (corrigé) = 4620 N/mm^2

Et finalement, la force de coupe est :

$$F_c = 4620 \times 0.1 \times 5 = 2310 \text{ N} \quad (\text{IV.3}).$$

IV.2.2. Moment de coupe

Le moment de coupe est défini par : $M_C = F_c \times H$ (IV.4).

Avec H est le bras de levier ($H=400$ mm)

Par conséquent $M_C = 2310 \times 400 \times 10^{-3} = 924 \text{ N.m}$ (IV.5).

IV.2.3. Puissance de coupe

Elle est définie par :

$$P_{c.b} = \frac{k_S \cdot a_r \cdot a_p \cdot f_z \cdot Z \cdot V_c}{60 \cdot 10^3 \cdot \pi D} \quad (\text{IV.6}).$$

Alors : $P_{c.b} = \frac{4620 \times 80 \times 5 \times 0.1 \times 6 \times 16}{60 \times 10^3 \times \pi \times 100} = 0.94 \text{ KW}$ (IV.7).

IV.2.4. Puissance du moteur

La puissance du moteur de la broche, on supposant un rendement $\eta = 0.8$ est donnée par :

$$P_{m.b} = \frac{P_b}{\eta} \tag{IV.8.}$$

Par conséquent :
$$P_{m.b} = \frac{0.94}{0.8} \cong 1.175 \text{ KW} \tag{IV.9.}$$

IV.2.5. Vérification des calculs graphiquement

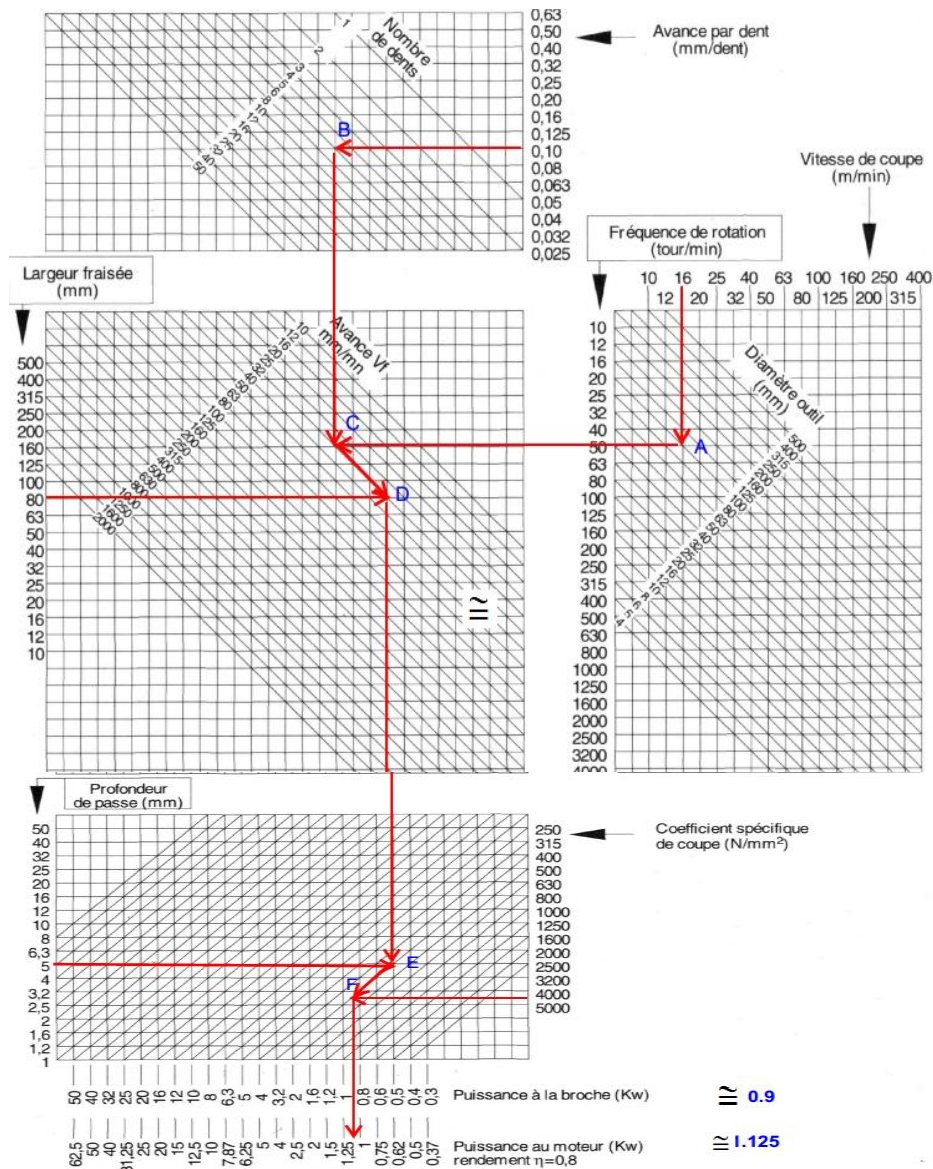


Figure IV.2. Abaque pour calcul de puissance de la broche et du moteur. [16]

On remarque que les valeurs de la puissance obtenues graphiquement et par calcul sont légèrement différentes. Ceci est dû au fait que la valeur de K_S déterminée graphiquement n'est pas précise.

IV.3. Dimensionnement de la vis

Pour dimensionner la vis, il faut d'abord évaluer l'effort totale F_t nécessaire pour vaincre l'effort de frottement F_m provoqué par les glissières et l'effort de coupe F_c .

La force totale exercée sur la noix de l'écrou est donnée par :

$$F_t = F_m + F_c \quad (\text{IV.10}).$$

IV.3.1. Calcul de la résistance au déplacement F_m

Pour cela on pose un coefficient de frottement du chariot sur ses guides, $\mu=0.1$ (cas le plus défavorable : glissière non lubrifiée).

La résistance au déplacement est donnée par [Catal 4] :

$$F_m = \mu \times F + f \quad (\text{IV.11}).$$

Avec F la charge donnée par $F=mg$ ($g=9.81$ l'accélération de la pesanteur).

Et f la résistance au joint donnée par le constructeur selon le type des glissières.

Tableau IV.3. La résistance au joint en fonction du type des glissières. [Catal 4]

Type	MS15	MS20	MS25	MS30	MS35	MS45	MS55
Résistance au joint (N)	0.15	0.2	0.35	0.7	0.8	0.9	1.0

La masse est répartie de manière égale sur les quatre glissières, 10 kg pour chacune.

On sélectionnant une valeur maximale de $f=1.0$ N, on obtient :

$$F_{1m} = \mu \times m_1 \times g + f \quad (\text{IV.12}).$$

$$F_m = 0.1 \times 10 \times 9.81 + 1.0 = 10.81 \cong 11 \text{ N} \quad (\text{IV.13}).$$

Par conséquent, la résistance au déplacement totale :

$$F_m = 4 \times F_{1m} = 4 \times 11 = 44 \text{ N} \quad (\text{IV.14}).$$

IV.3.2. Calcul du couple au démarrage (couple minimal de transmission C_{\min})

Il s'agit du couple requis pour surmonter les forces suivantes pour démarrer la rotation :

- ✓ L'inertie totale de toutes les pièces mobiles.
- ✓ Le frottement interne de l'ensemble vis/écrou, des roulements et des dispositifs de guidage associés.

On doit calculer la puissance mécanique minimale P_{\min}

$$P_{\min} = F_m * Va \quad (\text{IV.15}).$$

La puissance électrique est donnée par:

$$Pelc_{\min} = \frac{P_{\min}}{\eta} \quad (\text{IV.16}).$$

Avec $V_a = 2\text{cm/s} = 1.2 \text{ m/mn}$, $F_m = 44 \text{ N}$ et $\eta = 0.9$ (rendement de transformation du mouvement de rotation en translation), on a :

$$P_{\min} = 44 \times 0.02 = 0.88 \cong 0.9 \text{ W} \quad (\text{IV.17}).$$

Donc

$$Pelc_{\min} = \frac{P_{\min}}{\eta} = \frac{0.9}{0.9} = 1.0 \text{ W} \quad (\text{IV.18}).$$

Le couple au démarrage:

$$C_{\min} = \frac{P_{\min}}{\omega} \quad (\text{IV.19}).$$

Avec ω la fréquence de rotation [**Méc 1**]

$$\omega = \frac{\pi \times N}{30} = \frac{2\pi V_a}{p_z} \quad (\text{IV.20}).$$

$$N = \frac{60V_a}{P_z} = \frac{60 \times 20}{5} = 240 \text{tr} / \text{min} \quad (\text{IV.21}).$$

$$\omega = \frac{\pi \times 240}{30} = 25.13 \text{ rad} / \text{s} \quad (\text{IV.22}).$$

Et par conséquent, le couple minimal pour vaincre l'effort de frottement est :

$$C_{\min} = \frac{0.9}{25.13} = 0.0358 \cong 0.04 \text{ N.m} \quad (\text{IV.23}).$$

IV.3.3. Couple de charge C_c

C'est le couple nécessaire pour vaincre l'effort de frottement et l'effort de coupe pour démarrer la rotation au cours de l'usinage, il est donné par [**Tech 1**]:

$$C_c = \frac{F_t \times P_z}{2\pi \times \eta} \quad (\text{IV.24}).$$

La force totale exercée sur la noix de l'écrou est donnée par :

$$F_t = F_m + F_c \quad (\text{IV.25}).$$

$$F_t = 44 + 2310 = 2354 \text{ N} \quad (\text{IV.26}).$$

Ce qui donne :

$$C_c = \frac{2354 \times 5 \times 10^{-3}}{2 \times \pi \times 0.9} = 2.081 \cong 2.1 \text{ N.m} \quad (\text{IV.27}).$$

IV.3.4. Diamètre de la vis

Pour dimensionner le diamètre de la vis d , on doit utiliser un critère de dimensionnement.

En utilisant le critère de VON-MISES qui donne pour le cas présent [Méc 2]:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{f.\max}^2 + 3\tau_{\max}^2} \leq \frac{R_e}{f_s} \quad (\text{IV.28}).$$

Avec σ_{eq} est la contrainte équivalente, R_e la limite élastique, et f_s le coefficient de sécurité, $\sigma_{f.\max}$ et τ_{\max} sont respectivement les contraintes de flexion maximale et la contrainte de torsion maximale tenant compte de leurs coefficients de concentrations de contrainte.

$\sigma_{f.\max}$ et τ_{\max} sont donnés par les relations suivantes :

$$\sigma_{f.\max} = k_f \sigma_f \quad ; \quad \tau_{\max} = k_t \tau_t \quad (\text{IV.29}).$$

Avec :

$$\sigma_f = \frac{M_f \cdot R}{I_{x3}} \quad \sigma_t = \frac{M_t \cdot R}{I_0} \quad (\text{IV.30}).$$

R est le rayon de la vis.

On suppose que la vis n'est soumise à qu'un moment de flexion provoqué par la force de coupe exercé sur la noix, ce qui conduit à $\tau_t = 0$, d'où :

$$\frac{M_f \cdot R}{I_{x3}} < \frac{R_e}{f_s \cdot k_t} \quad (\text{IV.31}).$$

Avec $R = \frac{d}{2}$ (d désigne le diamètre de la vis) et $I_{x3} = \frac{\pi d^4}{32}$ le moment quadratique par rapport à l'axe z ; on aura :

$$d > \left(\frac{16 \times M_f \times f_s \times k_t}{\pi \times R_e} \right)^{1/3} \quad (\text{IV.32}).$$

On choisit comme matériau l'acier trempé 42 CrMo4 pour les vis standard de diamètre >16 mm et de limite élastique. $R_e = 800 \text{ MPa}$

Pour déterminer un diamètre approximatif de la vis, on prend un coefficient de sécurité de $f_s=3$, un facteur de concentration de contrainte $k_t=1$ (arbre pleine).

L'excentricité est donné par : $e = 160 \text{ mm}$

Par conséquent le moment fléchissant est donné par :

$$M_f = F_a \times e \tag{IV.33}.$$

$$M_f = 2310 \times 160 \times 10^{-3} = 369.6 \text{ N.m} \tag{IV.34}.$$

On remarque que l'effet du couple de torsion est négligeable par rapport à l'effet de flexion.

$$\frac{M_f}{M_t} \cong 167 \quad M_t \ll M_f$$

Par conséquent
$$d > \left(\frac{16 \times 369.6 \times 10^3 \times 3 \times 1}{\pi \times 800} \right)^{1/3} = 19.2 \text{ mm}.$$

D'après le (tableau IV.4), le diamètre normalisé le plus proche est de : $d_1 = 20 \text{ mm}$, avec un pas de 5mm, un diamètre de bille $D_w = 3 \text{ mm}$ et un nombre de rangé de billes $i = 4$.

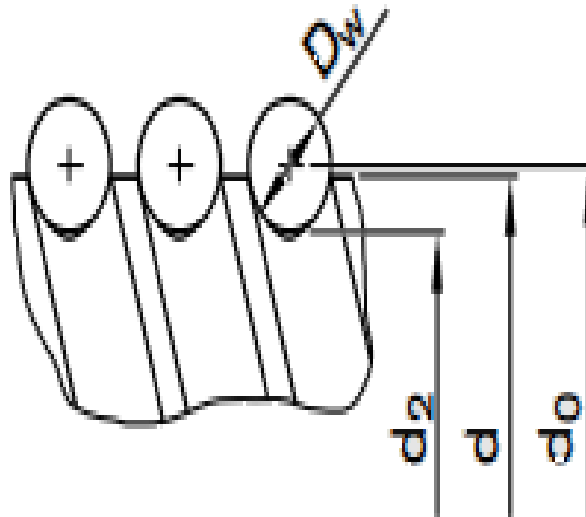


Figure IV.3. Les différents diamètres pour une vis à billes. [Catal 3]

Tableau IV.4. Table des diamètres normalisés pour vis à bille. [18]

Vis à billes : extraits de dimensions (SKF)											
d	pas	L_{max} vis	D g6	D_1	S	T	U	D_2 js12	K trou lisse pour vis	L_1	L_2 js13
16	5	2 100	28	48	6	10	11	38	6 × M5	50,5	52
20	5	4 300	33	57	6	12	15	45	6 × M6	52,5	58
25	5	5 750	38	62	6	12	15	50	6 × M6	52,5	70
32	5	5 750	45	70	6	12	15	58	6 × M6	57,5	80
32	10	5 750	54	87	6	16	20	70	8 × M8 × 1	79	113
40	5	5 750	53	80	6	14	15	68	6 × M6	64,5	94
40	10	5 750	63	95	6	16	20	78	8 × M8 × 1	99	134
50	10	5 750	72	110	6	16	20	90	8 × M8 × 1	99	157
63	10	5 750	85	125	6	20	20	105	8 × M8 × 1	103	161
80	20	5 750	115	170	10	27	30	142	8 × M8 × 1	218	—

Si l'arbre possède un épaulé, alors on doit introduisant le facteur de concentration de contrainte k_f .

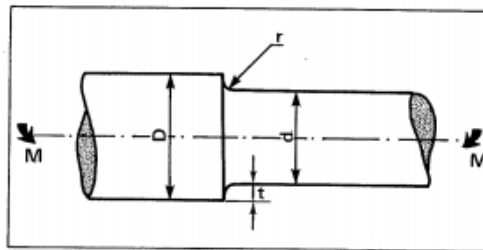


Figure IV.4. Arbre épaulé soumise à un moment de flexion. [19]

Pour $d = D = 20$ mm, $d = 16$ mm, $\frac{r}{t} = \frac{2 \times r}{D - d} = \frac{2 \times 4}{20 - 16} = 2$ et à partir de la (figure IV.4), on trouve $k_f = 1,37$.

Par conséquent
$$d > \left(\frac{16 \times 369.6 \times 10^3 \times 3 \times 1.37}{\pi \times 800} \right)^{1/3} = 21.4 \text{ mm.}$$

Alors de la table 4, le diamètre normalisé le plus proche est $d = 25$ mm.

Les contraintes nominale et réelle sont respectivement :

$$\sigma_{nom} = \frac{32M_f}{\pi d^3} = \frac{32 \times 369.6 \times 10^3}{\pi \cdot 25^3} \cong 241 \text{ N/mm}^2 \tag{IV.35.}$$

$$\tau_{réel} = k_t \times \tau_{nom} = 1.37 \times 241 \cong 330.17 \text{ N/mm}^2 \tag{IV.36.}$$

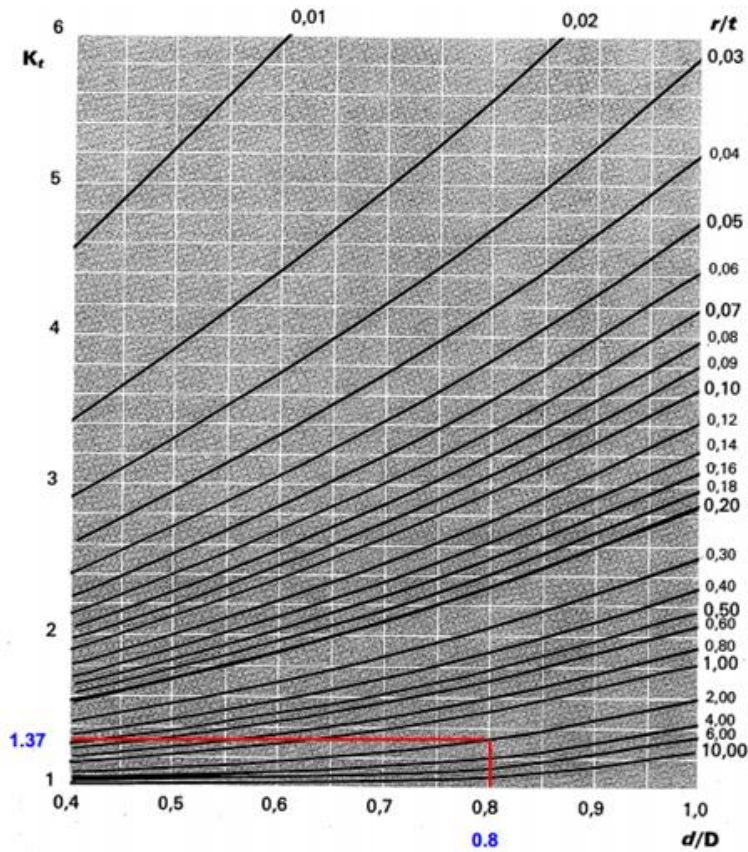


Figure IV.5. Le facteur de concentration de contrainte dans le cas d'un arbre épaulé en flexion. [19]

IV.3.5. La charge axiale admissible

Si la charge au-delà du quelle la vis risque d'avoir un phénomène de flambage.

La vis est soumise de la part de l'écrou à une charge axiale de compression comme la montre la (figure IV.6).

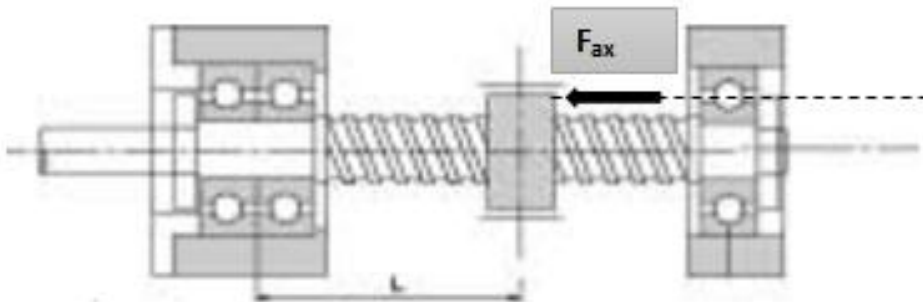


Figure IV.6. vis à bille soumise à une charge axiale de compression. [Catal 1]

✓ **Calcul de la section S de la vis**

$$S = \frac{\pi \times d^2}{4} \quad (\text{IV.37}).$$

Alors
$$S = \frac{\pi \times 25^2}{4} \cong 490.87 \text{ mm}^2 \quad (\text{IV.38}).$$

✓ **Moment quadratique I_{GZ}**

$$I_{GZ} = \frac{\pi \times d^4}{64} \quad (\text{IV.39}).$$

Alors
$$I_{GZ} = \frac{\pi \times 25^4}{64} \cong 19174.75 \text{ mm}^4 \quad (\text{IV.40}).$$

✓ **Calcul du rayon de giration**

$$\rho = \sqrt{\frac{I_{GZ}}{S}} \quad (\text{IV.41}).$$

Alors
$$\rho = \sqrt{\frac{19174.75}{490.87}} \cong 6.25 \text{ mm} \quad (\text{IV.42}).$$

✓ **Elancement de la vis λ**

D'abord on doit déterminer la longueur libre de la vis selon le type de la configuration ; la (figure IV.5) donne ces différentes configurations.

La vis à billes est guidée à une seule extrémité par deux roulements à billes et soumis à une charge purement axiale de compression de la part de l'écrou, par conséquent la configuration 2 convient.

L'écrou est au maximum à $l = 400 \text{ mm}$, alors la longueur libre $L = 2l = 800 \text{ mm}$.

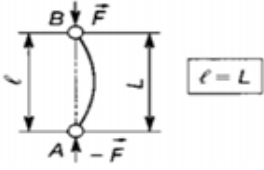
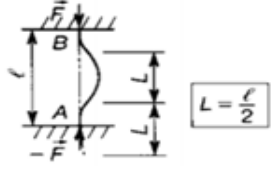
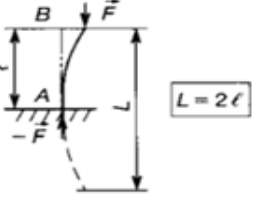
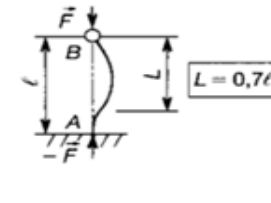
LONGUEURS LIBRES DE FLAMBAGE			
Types de liaisons	Valeurs de L	Types de liaisons	Valeurs de L
① En A et B : liaisons pivots.	 $l = L$	③ En A et B : liaisons encastrement.	 $L = \frac{l}{2}$
② En A : liaison encastrement. En B : extrémité libre.	 $L = 2l$	④ En A : liaison encastrement. En B : liaison pivot.	 $L = 0,7l$

Figure IV.7. Différents configuration pour le calcul de la longueur libre. [20]

On a
$$\lambda = \frac{2l}{\rho} \tag{IV.43}.$$

Alors
$$\lambda = \frac{2 \times 400}{6,25} \cong 128 \tag{IV.44}.$$

✓ Critère de résistance

Selon la valeur de l'élancement de la poutre, la charge limite F_{adm} est donnée par l'une des trois relations. Le tableau 6 donne ces trois relations.

Tableau IV.5. La charge admissible selon la valeur de l'élancement. [20]

Poutres courtes $\lambda < 20$	Poutres moyennes $20 < \lambda < 100$	Poutres élancées $\lambda > 100$
compression simple $F_{adm} = R_{pc} \cdot S$	Formule expérimentale de Rankine $F_{adm} = \frac{R_{pc} \cdot S}{1 + \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}$	Formule d'Euler $F_{adm} = \frac{R_{pc} \cdot S}{2 \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}$

Comme $\lambda > 100$, alors on peut utiliser la formule d'Euler.

$$F_{adm} = \frac{R_{pc} \cdot S}{2 \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} \tag{IV.45}.$$

Avec λ_c représente l'élanement critique du matériau, E module d'élasticité longitudinal (Mpa).

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{E \times \pi^2}{R_e}} \quad (\text{IV.46}).$$

Alors
$$\lambda_c = \sqrt{\frac{210 \times 10^3 \times \pi^2}{800}} \cong 51 \quad (\text{IV.47}).$$

Par conséquent
$$F_{adm} = \frac{1000 \times 452.4}{2 \cdot \left(\frac{128}{51}\right)^2} \cong 36 \text{ kN} \quad (\text{IV.48}).$$

IV.3.6. Charge critique d'Euler F_c

Si la charge qui ne doit pas atteint pour que la vis ne risque pas d'avoir un phénomène de flambage, elle est donnée par [20] :

$$F_c = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot S}{\lambda^2} \quad (\text{IV.49}).$$

Ce qui donne
$$F_c = \frac{\pi^2 \times 210 \cdot 10^3 \times 490.78}{128^2} \cong 62.1 \text{ kN} \quad (\text{IV.50}).$$

IV.3.7. Calcule de la charge axiale de fonctionnement admissible et de la vitesse Graphiquement

Pour trouver la charge de fonctionnement par la méthode graphique, on doit d'abord définir les types de montage utilisée pour vis à billes.

Il existe quatre types de montage :

- ✓ Montage extrémité gauche et droite fixes.

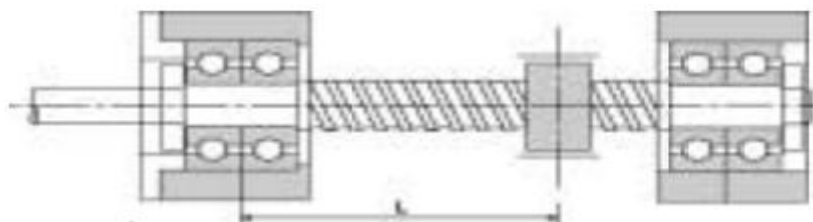


Figure IV.8. Montage type fixe-fixe. [Catal 1]

- ✓ Montage extrémité gauche fixe et droite supporté

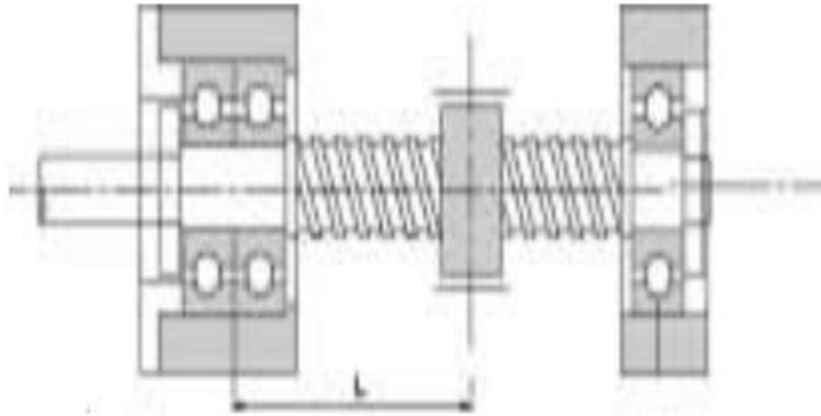


Figure IV.9. Montage type fixe-supporté. [Catal 1]

- ✓ Montage extrémité gauche fixe et droite libre.

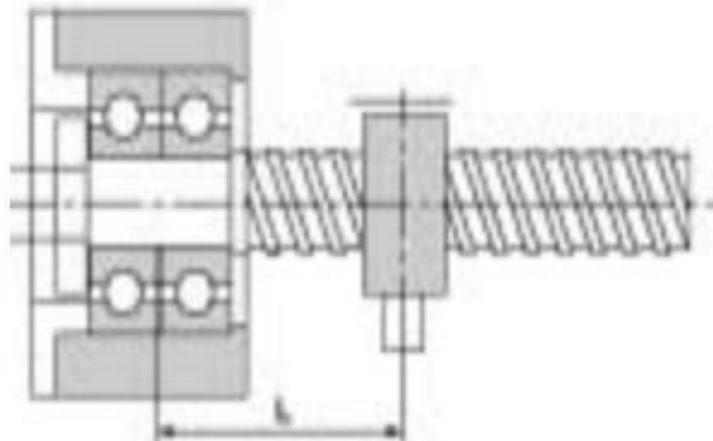


Figure IV.10. Montage type fixe-libre. [Catal 1]

- ✓ Montage extrémités gauche et droite supportées.

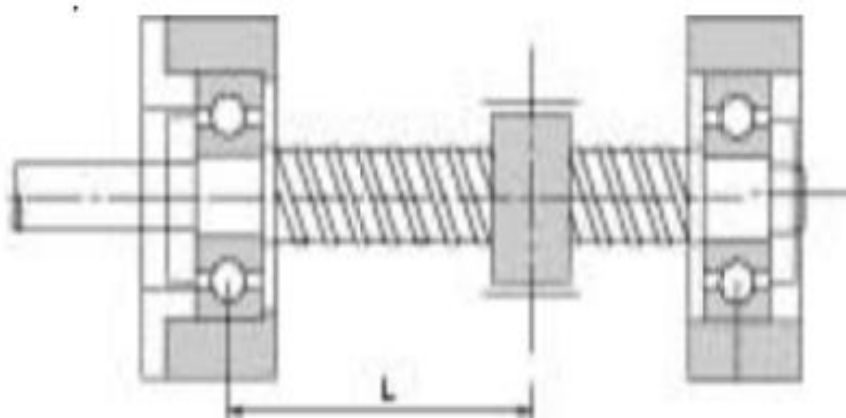


Figure IV.11. Montage type supporté-supporté. [Catal 1]

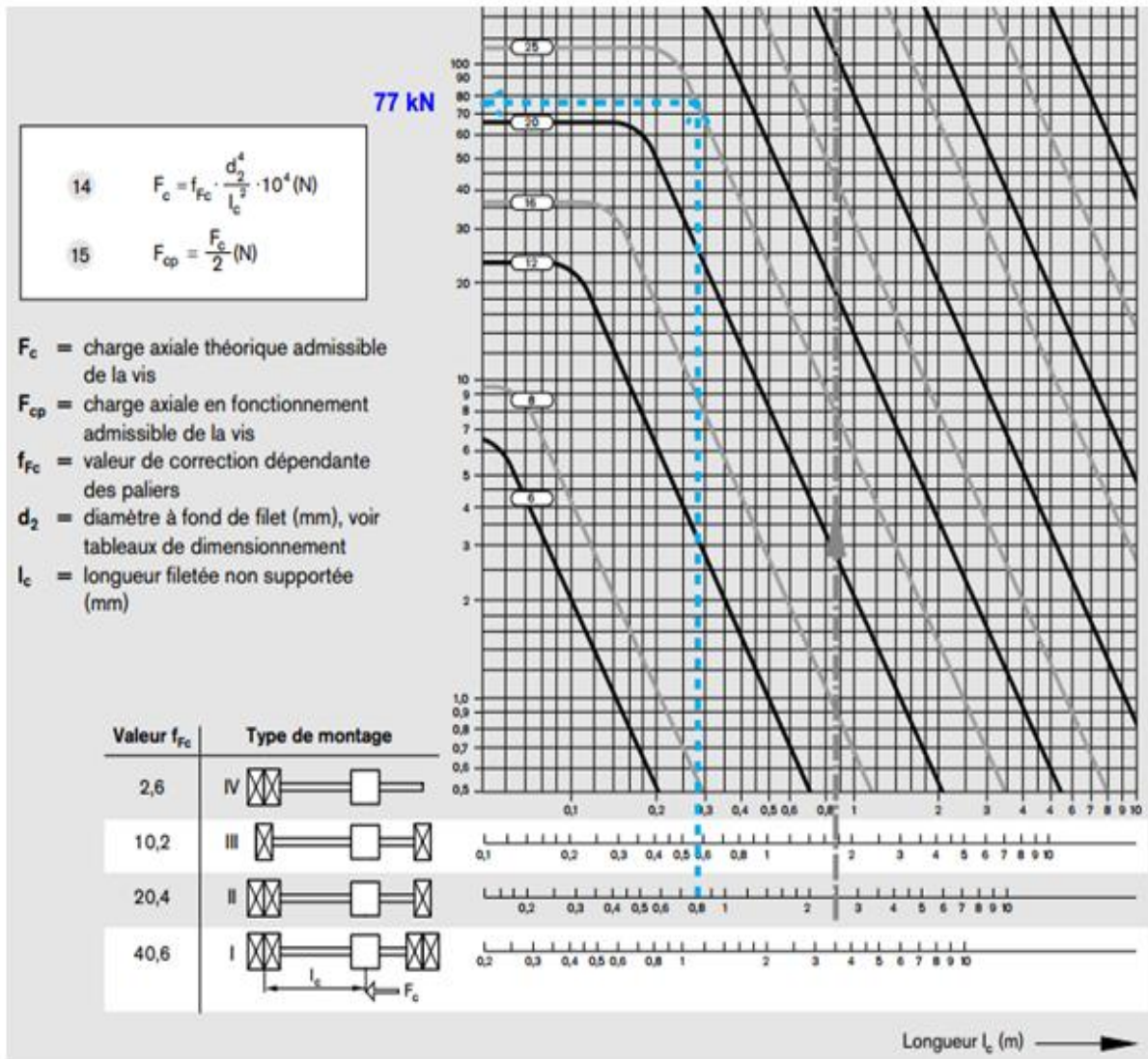


Figure IV.12. Charge de fonctionnement admissible de la vis en fonction du type de montage et du diamètre. [Catal 3]

Donc pour un montage extrémités gauche fixe et droit supporté, le constructeur Rexroth Bosch Groupe donne l'abaque représenté sur la (figure IV.12).

Donc pour un diamètre $d_1=25$ mm, une longueur libre $L=800$ mm.

On trouve une charge axiale théorique admissible $F_{th.adm} = 77$ KN.

La charge axiale en fonctionnement admissible F_{adm} est donnée par :

$$F_{adm} = \frac{F_{th.adm}}{2} \tag{IV.51}.$$

Alors

$$F_{adm} = \frac{77}{2} = 38.5 \text{ KN} \tag{IV.52}.$$

Elle est donc supérieure à la charge de fonctionnement maximale.

IV.3.8. Vitesse critique

Selon le type de montage, on choisit d'abord la valeur f_{ncr} de correction correspondant au type de paliers. [Catal 3]

Tableau IV.6. Coefficient de correction en fonction du type de montage.

Type de montage	Fixe-fixe	Fixe-supporté	Fixe-libre	supporté-supporté
Coefficient de correction f_{ncr}	27.4	18.9	4.3	12.1

La vitesse critique est donnée par la formule suivante [Catal 3] :

$$n_{cr} = f_{ncr} \cdot \frac{d_2}{l_{cr}} \cdot 10^7 \text{ (min}^{-1}\text{)} \quad \text{(IV.53).}$$

Avec

d_2 Diamètre à fond de filet (mm)

l_{cr} Longueur critique (mm)

Pour le montage type fixe-supporté on prend $f_{ncr}=18.9$

$d_2=23 \text{ mm}$; $l_{cr}=1400 \text{ mm}$

Alors

$$n_{cr} = 18.9 \times \frac{23}{1400^2} \times 10^7 \cong 2218 \text{ tr / min (min}^{-1}\text{)} \quad \text{(IV.54).}$$

IV.3.9. Vitesse de fonctionnement admissible

La vitesse de fonctionnement admissible est donnée par [Catal 3] :

$$n_{crp} = 0.8 \times n_{cr} \quad \text{(IV.55).}$$

Alors

$$n_{crp} = 0.8 \times 2218 \cong 1774.4 \text{ tr / min (IV.56).}$$

Pour justifier notre valeur on utilise l'abaque donné par la figure 11 qui donne la valeur de la vitesse critique en fonction de la longueur critique.

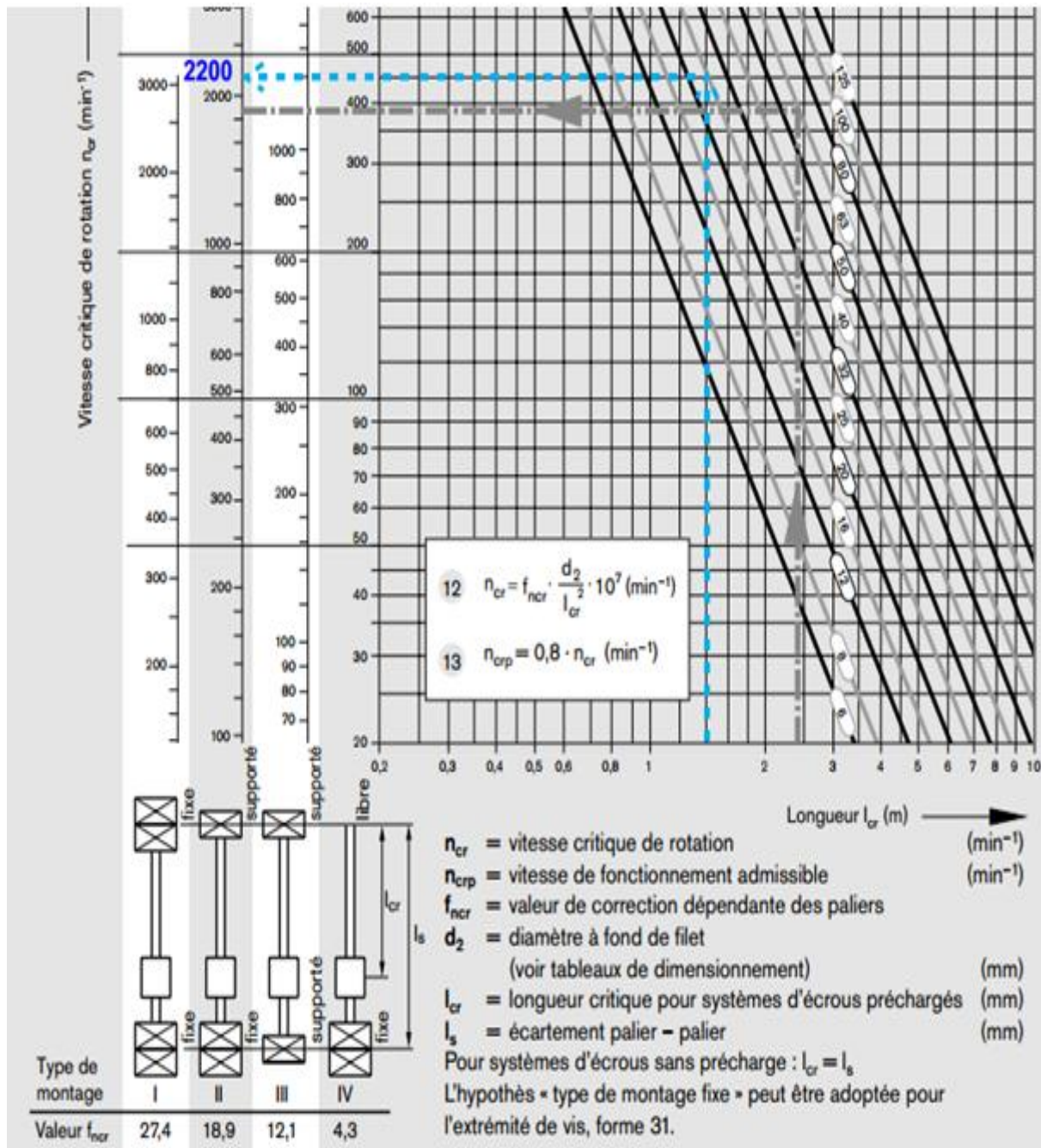


Figure IV.13. Vitesse critique de rotation de la vis en fonction du type de montage et du diamètre. [Catal 2]

Alors pour une longueur critique de 1.4 m et selon le type de montage fixe-supporté

$f_{ncr}=18.9$, un diamètre $d = 25$ mm, on aura une vitesse critique $n_{crp}=2200 \text{ min}^{-1}$ qui est proche de la valeur calculé.

Et par conséquent

$$n_{crp} = 0.8 \times 2200 = 1760 \text{ min}^{-1}. \tag{IV.57}$$

IV.4. Calcul de roulement

IV.4.1. Définition

Un roulement est un organe mécanique assurant principalement :

- ✓ Le positionnement de l'arbre par rapport à l'alésage
- ✓ Une rotation précise avec un minimum de frottement
- ✓ La transmission des efforts radiaux, axiaux ou les deux à la fois suivant le type de roulement. [Méc 1]

IV.4.2. Constitution d'un roulement

Un roulement est principalement constitué des éléments suivants :

- ✓ Bague extérieure qui se positionne dans le moyeu (appelé souvent logement).
- ✓ Bague intérieure qui s'ajuste sur l'arbre.
- ✓ Les éléments roulants : billes, rouleaux (cylindriques, coniques, sphériques), aiguilles qui roulent sur les chemins des deux bagues et qui permettent la rotation d'une bague par rapport à l'autre.
- ✓ La cage qui maintient les éléments roulants à intervalles réguliers.

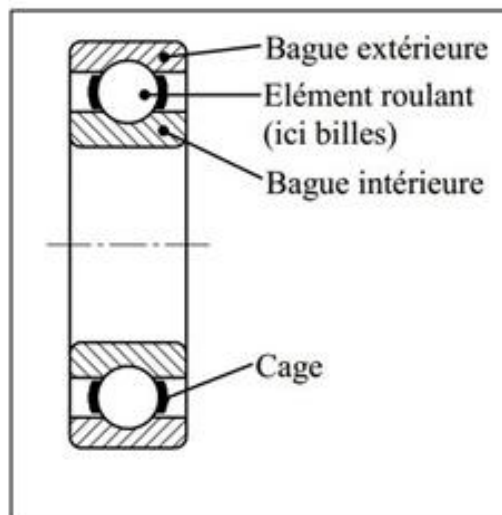


Figure IV.14. Constitution d'un roulement. [Méc 1]

IV.4.3. Type de roulement

Les roulements sont de différents types : les roulements rigides à billes (contact radial ou oblique), roulements à rotule (à billes ou à rouleaux sphériques), roulements à rouleaux

cylindriques ou coniques, roulements à aiguilles, butées (à billes, à rouleaux cylindriques ou sphériques, à aiguilles).

Le type de roulement à préconiser pour assurer la liaison pivot d'un palier est conditionné par deux paramètres :

- ✓ La direction de la charge qui peut être radiale, axiale ou radiale et axiale.
- ✓ L'importance du fléchissement de l'arbre qui résulte des charges radiales et qui tend à provoquer un désalignement (rotulage) des bagues l'une par rapport à l'autre. [Méc 1]

Roulements rigides à billes

Ces roulements permettent de supporter des charges radiales moyennes et des charges axiales faibles. L'angle de rotulage admissible est de 2 à 16'.

Roulements à contact oblique

Ces roulements supportent des charges radiales et axiales moyennes. L'angle de rotulage est de 1 à 2'.

Roulements à rotule sur billes et sur rouleaux sphériques

Ces roulements peuvent supporter des charges radiales et axiales. Les roulements à billes conviennent aux charges radiales moyennes et aux charges axiales faibles à moyennes suivant le type de roulement. Lorsque la capacité de charge est insuffisante pour les rotules sur billes, on peut recourir aux roulements à rotules sur rouleaux sphériques. L'angle de rotulage est de 1,5 à 3°.

Roulements à rouleaux cylindriques et à rouleaux coniques

Les roulements à rouleaux cylindriques ne supportent que des charges purement radiales et exigent un alignement des bagues excellent (rotulage: 2 à 4').

Les roulements à rouleaux coniques conviennent aux charges radiales et axiales importantes, mais ils exigent aussi un excellent alignement des bagues (rotulage: 1 à 4').

Roulements à aiguilles

Ces roulements ne supportent que des charges purement radiales et ne tolèrent pratiquement aucun rotulage.

IV.4.4. Emplacement des roulements

Pour des raisons de rigidité, on pose que le système de rotation de la broche comporte deux roulements rigides à billes, l'emplacement de ces derniers est représenté sur la figure suivante :

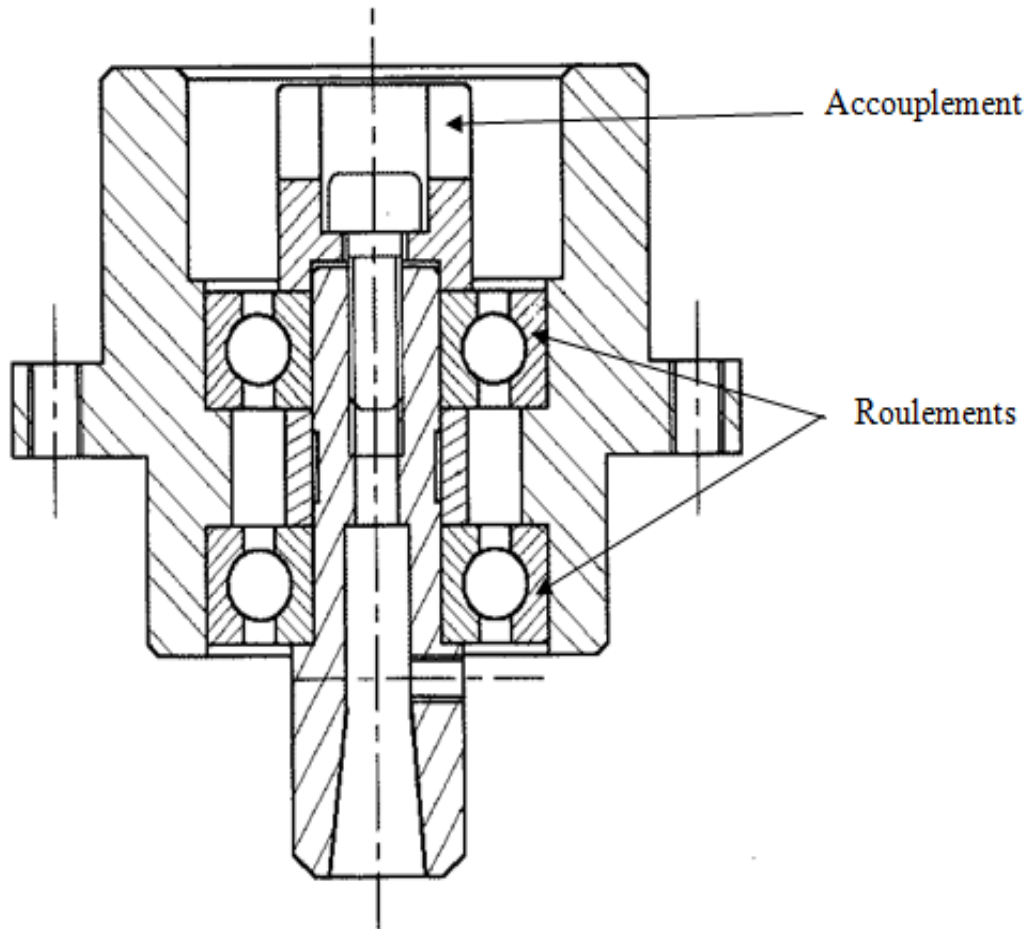


Figure IV.15. Dessin présente l'emplacement des roulements.

Ces deux roulements doivent fonctionner à une vitesse $N = 3000$ tr/mn sous une charge constante ayant pour composantes :

- ✓ F_r : représente la force de coupe qui vaut 2310 N
- ✓ F_a : représente le poids de la broche, elle est donnée par :

$$F_a = m_b \cdot g = 30 \cdot 9.81 = 294.3 \text{ N}$$

Remarque :

L'arbre est soumis à des charges radiales sensiblement élevées et à des charges axiales faibles, les roulements rigides à billes sont convenables pour notre cas.

IV.4.5. Caractéristiques du roulement

L'arbre de la broche est de diamètre $d = 30$ mm. On choisit un roulement de type SKF N° W 6006-2RS1 d'après le catalogue SKF. Le tableau suivant présente ces caractéristiques :

Tableau IV.7. Caractéristiques du roulement SKF N° W 6006-2RS1. [Catal 5]

Caractéristiques du roulement SKF N° W 6006-2RS1			
Symbole	Désignation	Valeur	Unité
d	diamètre d'alésage	30	mm
D	diamètre de la bague extérieure	55	mm
B	largeur du roulement	13	mm
C	charge dynamique de base	13300	N
C _o	charge statique de base	8300	N
P _u	limite de fatigue	355	N

IV.4.6. Charge dynamique équivalente

Pour les roulements montés séparément, elle est donnée par la relation :

$$P = F_r \text{ Si } \frac{F_a}{F_r} < e \tag{IV.58.}$$

$$P = X.F_r + Y.F_a \quad \text{Si } \frac{F_a}{F_r} > e \tag{IV.59.}$$

On a $\frac{F_a}{F_r} = \frac{294,3}{2310} = 0,127 \tag{IV.60.}$

Et $\frac{F_a}{C_0} = \frac{294,3}{8300} = 0,035 \tag{IV.61.}$

Pour les roulements rigides à une ou deux rangées de billes de classe de jeu normal, les valeurs de e, X et Y sont données par le tableau suivant [Catal 5] :

Tableau IV.8. Coefficients de calcul pour roulements rigides à une ou deux rangées de billes.

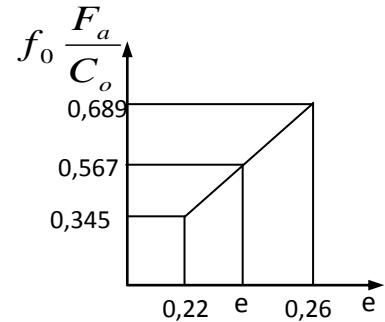
Coefficients de calcul pour roulements rigides à une ou deux rangées de billes									
$f_0 \frac{F_a}{C_0}$	0,172	0,345	0,689	1,03	0,38	2,07	3,45	5,17	6,89
e	0,19	0,22	0,26	0,28	0,30	0,34	0,38	0,42	0,44

X	0,56								
Y	2,30	1,99	1,71	1,55	1,45	1,31	1,15	1,04	1

Valeur du coefficient e

La valeur de coefficient de calcul $f_0 = 16$ pour notre roulement donc on a : $f_0 \frac{F_a}{C_o} = 0,567$

$$e = 0,22 + \frac{0,26 - 0,22}{0,689 - 0,345} (0,689 - 0,567) \approx 0,241$$



$$\frac{F_a}{F_r} = 0,127 < e \quad \text{Donc } P = F_r = 2310$$

IV.4.7. Durée de vie nominale

La durée de vie L_{10} s'exprime par la relation :

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^n \tag{IV.62}.$$

Pour les roulements à billes, on a $n = 3$. Il vient :

$$L_{10} = \left(\frac{13300}{2310} \right)^3 = 190,86 \text{ Millions de tours.} \tag{IV.63}.$$

Soit :

$$L_{10h} = \frac{10^6 L_{10}}{60N} = \frac{10^6 \times 19,71}{60 \times 3000} \approx 1060,3 \text{ heures} \tag{IV.64}.$$

IV.4.8. Le coefficient de sécurité statique s_0

Le facteur s_0 exprime la sécurité contre une déformation permanente et assure un fonctionnement silencieux, il est défini par :

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} \tag{IV.65}.$$

P_0 Étant la charge statique équivalente.

$$P_0 = X_0 \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a \tag{IV.66}.$$

Si $P_0 < F_r$ on prendra $P_0 = F_r$

Tableau IV.9. Coefficients e, X, Y, X0, et Y0. [Catal 5]

Type de roulement		e	F _a /F _r ≤ e		F _a /F _r > e		X ₀	Y ₀
			X	Y	X	Y		
A billes à contact radial à une ou deux rangées		dépend du rapport F _a /C ₀	1	0	0,56	dépend de F _a /C ₀	0,6	0,5
A billes à contact oblique	à une rangée	1,14	1	0	0,35	0,57	0,5	0,26
	à deux rangées	0,86	1	0,73	0,62	1,17	1	0,63
A rotule sur billes		voir catalogue	1	voir catalogue	0,65	voir catalogue	1	voir catalogue
A rotule sur rouleaux		voir catalogue	1	voir catalogue	0,67	voir catalogue	1	voir catalogue
A rouleaux coniques		voir catalogue	1	0	0,4	voir catalogue	0,5	voir catalogue
Butée à rotule sur rouleaux		_____	_____	si F _r /F _a ≤ 0,55				
				1,2	1	2,7	1	

D'après le tableau 9, on trouve :

$$P_0 = 0,6.2310 + 0,6.294.3 = 1331,58 N < F_r \tag{IV.67}.$$

Donc $P_0 = F_r = 2310 N$

Le coefficient de sécurité vaut donc

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} = \frac{8300}{2310} = 3,59 \tag{IV.68}.$$

D'après le tableau des valeurs du coefficient de sécurité, pour un roulement à billes de fonctionnement élevé, quel que soit le mode de fonctionnement (régulier sans vibration, normal ou avec chocs prononcés) s_0 vaud 2, donc le roulement choisis est sécuritaire.

Tableau IV.10. valeur du coefficient de sécurité d'après le catalogue SKF. [Catal 5]

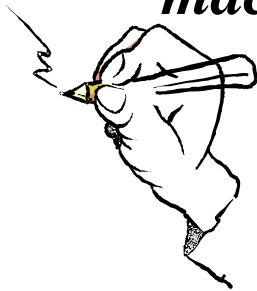
Mode de fonctionnement	ROULEMENTS EN ROTATION						Roulement à l'arrêt	
	Exigences de fonctionnement							
	faibles		Normales		élevées			
	Roulements à billes	Roulements à rouleaux	Roulements à billes	Roulements à rouleaux	Roulements à billes	Roulements à rouleaux	Roulements à billes	Roulements à rouleaux
Régulier sans vibrations	0,5	1	1	1,5	2	3	0,4	0,8
Normal	0,5	1	1	1,5	2	3,5	0,5	1
Chocs prononcés	$\geq 1,5$	$\geq 2,5$	$\geq 1,5$	≥ 3	≥ 2	≥ 4	≥ 1	≥ 2

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé le dimensionnement de la vis à billes, la broche et leur moteur d'entraînement ainsi que le calcul des roulements

***Chapitre V. Réalisation et test de la
machine.....106-109***

Page



Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter une description réelle de la machine réalisée.

V.1. Caractéristiques de la machine

Notre projet consiste à réaliser une machine à commande numérique verticale à trois axes destinés à l'usinage des pièces de différentes formes (fraiseuse 3 axes).

V.1.1. Bâti

Le bâti doit être suffisamment rigide pour assurer une bonne stabilité de la machine.

Poids : 190kg. ; **Matériau :** Fonte grise laminé.



Figure V.1. Le bâti.

V.1.2. Espace de travail

- ✓ Axe longitudinal : X 200 mm Maxi
- ✓ Axe transversal : Y 300 mm Maxi
- ✓ Axe vertical : Z 100 mm Maxi

V.1.3. Caractéristiques de la broche

- ✓ Puissance de la broche : 1.6KW ;
- ✓ Vitesse de rotation : 300 tr/mn ;
- ✓ Fixation manuelle de l'outil ;
- ✓ Diamètre maximale de perçage 30 mm.
- ✓ Fréquence de rotation : 50Hz.



Figure V.2. La broche.

V.1.4. Les axes X, Y

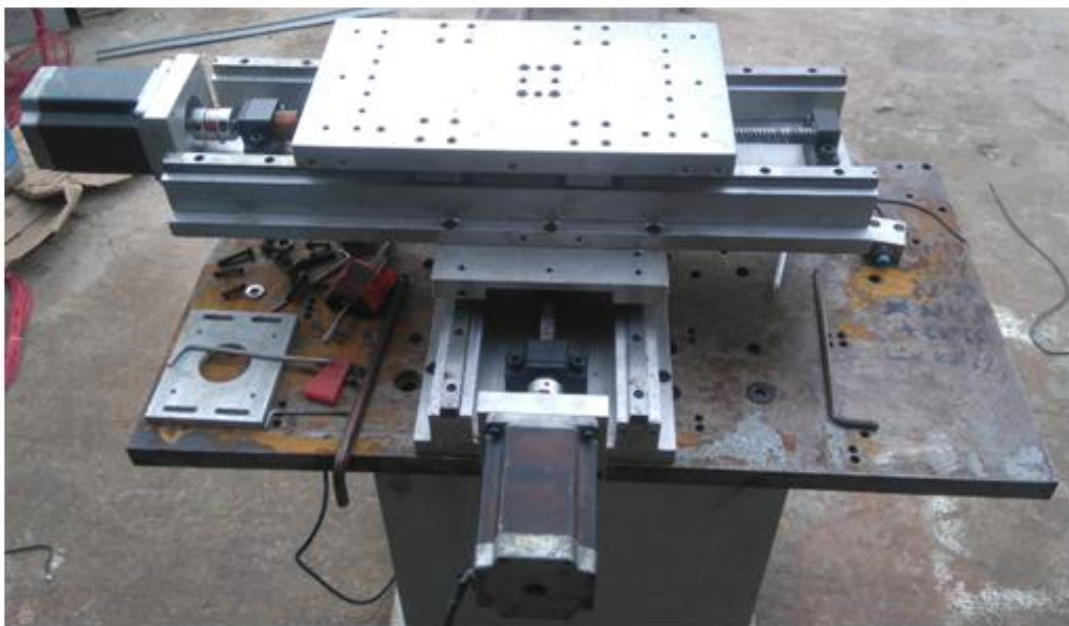


Figure V.3. Les axes X, Y.

V.1.5. la glissière



Figure V.4. La glissière.



Figure V.5. L'armoire de commande.

V.2. Test d'un simple usinage

Pour tester notre machine, on a usiné une forme simple sur un bloc d'aluminium, le Gcode est disponible sur annexe.

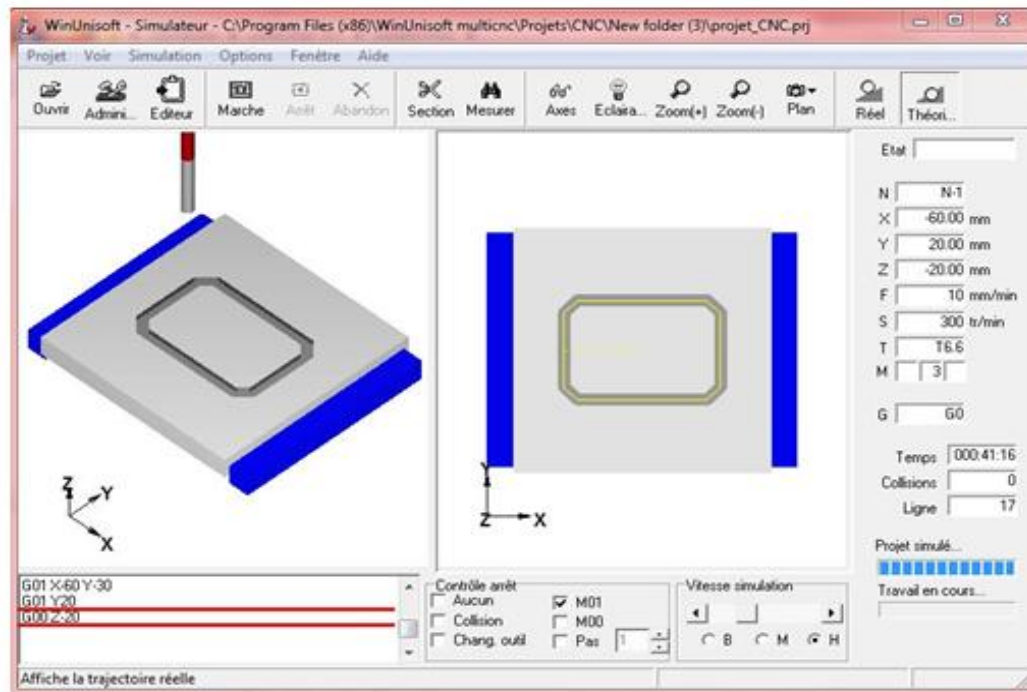
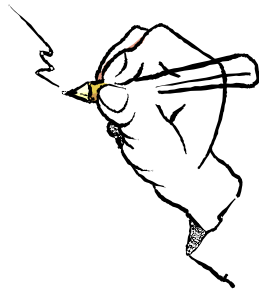


Figure V.6. Simulation d'usinage avec WinUnisoft.



Figure V.7. Résultat d'usinage.

Conclusion générale



Conclusion Générale

Ce projet de fin d'études a porté sur la conception et la réalisation d'un modèle de machine-outil à commande numérique à 3 axes pouvant répondre à un besoin pédagogique (programmation et travaux pratiques). C'est un prototype de capacité 300 x 200 x 100 mm. Il est donc conçu pour l'usinage de petites pièces présentant des surfaces simples ou de forme.

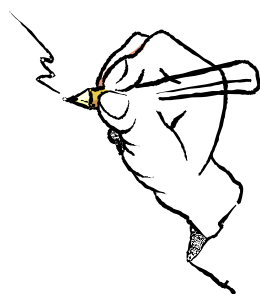
L'étude a été structurée comme suit :

- ✓ J'ai étudié les différents organes constituant la machine (axes, glissière, palier, roulement... etc.) ainsi que les moteurs d'entraînement et la broche.
- ✓ J'ai commandé la machine.
- ✓ J'ai effectué le dimensionnement de ces organes (calcul des vis à billes, des roulements et des moteurs d'entraînement).

Cette étude est suivie par la réalisation de cette machine.

Ce travail est une initiative en usinage 3D à commande numérique. Il est perfectible. Je souhaite qu'il soit continué à le développer en passant d'une simple fraiseuse à trois axes à plusieurs axes, système de lubrification, commander la vitesse de la broche (variateur de vitesse).

Références bibliographiques.....111-112
Page



Références bibliographiques

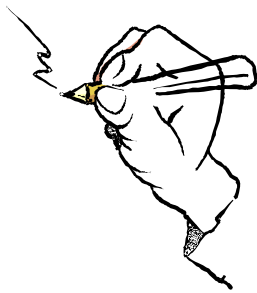
Références bibliographiques

- [1] https://www.google.dz/search?q=chapitre_1+Introduction+%C3%A0+la+commande+num%C3%A9rique&oq=chapitre_1&aqs=chrome.1.69i5912j0l4.5979j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8
- [2] <https://fr.scribd.com/document/54882596/Tournage-Fraisage-Machines-Outils>
- [3] <https://elearn.univouargla.dz/20132014/courses/MOCN/document/CHAPITREII.pdf?cidReq=MOCN>
- [4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine-outil_%C3%A0_commande_num%C3%A9rique
- [5] Claude Barlier, Lionel Girardin, “Mémotech productique : matériaux et usinage” Ed. Casteilla, pp 406, 1992.
- [6] Jean-Pierre Urso “Mémotech : commande numérique” Educalivre, pp 334, 1999.
- [7] René Magnin, Jean-Pierre Urso “Mémotech commande numérique : programmation” Ed. Casteilla, pp 220, 1991.
- [8] Andre Chevalier, Jacques Bohan, “Guide du technicien en productique” Hachette, pp 272, 1988.
- [9] Andre Chevalier, Jacques Bohan, “Guide du technicien en productique : pour maîtriser la production industrielle” Hachette technique, pp 288, 1998.
- [10] Iddir Smail, Slimani samir “Essais et Méthodologie en vue d’une exploitation rationnelle des MOCN” pp163, 1991,
- [11] A. Castell, A. Dupont “Technologie professionnelle générale” Desforges, paris, tom 1, pp167, 1978.
- [12] Insa/P.May “Les techniques de commande numérique des machines-outils” Masson Et Cie, 1970.
- [13] Claud Hazard “La commande numérique des machines-outils : Technologie, programmation, applications” Editions Foucher, Paris Masson, pp 174, 1984.
- [14] <https://fr.scribd.com/document/262567748/Feuilletage-pdf>

Références bibliographiques

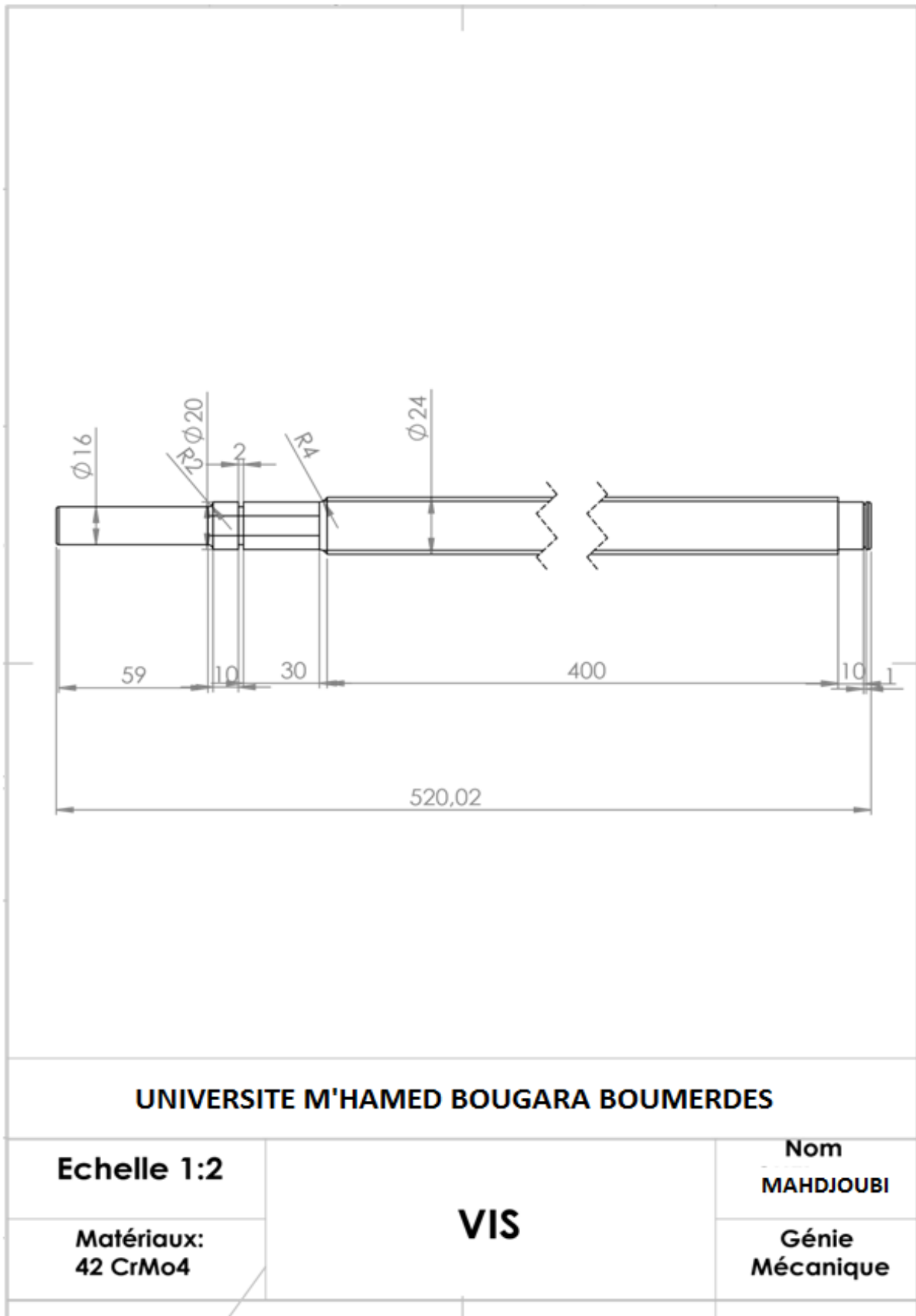
- [15] CHERMITI Hechmi, « Programmation Iso », Leçon 3, technologuepro [Document Electronique], ISET Kairouan, Disponible sur : <http://www.technologuepro.com/cours-production-commande-numerique/chapitre-3programmation-iso.pdf>
- [16] université-lille1. analyse-fabrication. [En ligne]. [Consulté le 14 Mai 2017].
Disponible sur <http://analyse-fabrication.univ-lille1.fr>
- [17] J. Vergnas, Génie Mécanique, « Usinage : Technologie et Pratique », Paris : Dunod, 1982. 301 p. ISBN 978-2-04-011186-1.
- [18] JEAN-LOUIS, FANCHON. « Guide des sciences et technologies industriels », Paris-la défense : Isabelle Hannebioque/Patrick Gonidou, 2014. 592 p. AFNOR NATHAN, Tour Europe, Cedex 7, 92049.
- [19] J.-P. Faurie, P. Monnier, A. Niku-Lari. « Les concentrations de contrainte », Guide du dessinateur. Paris : CETIM, 79 p.
- [20] « Flambement des poutres comprimées », Cours RDM Chapitre IX, AU : 2012-2013
Disponible sur : <http://www.technologuepro.com/resistance-des-materiaux-2/chapitre-9-flambement-des-poutres-comprimees.pdf>
- [Méc 1] Pr. Bouaziz, « dimensionnement des éléments technologique, Palier à roulements ». Cours de construction mécanique, ENP, 2013-2014.
- [Méc 2] Dr. Belkacmi « cours de RDM 2 », ENP ,2014-2015.
- [Tech 1] ABIGNOLI. M et GOELDEL C. « Moteur pas à pas », Technique de L'ingénieur, Traité Génie Electrique, D3690, PP.1-20, 1991.
- Catal 1] CSR, « Vis à billes ».
- [Catal 2] HIWIN « Ballscews Technical informations », 19^{ème} édition, juin 2016.
- [Catal 3] Rexroth BOSCH Groupe, « Guidages à billes sur rails », BOSCH Groupe, juin 2009.
- [Catal 4] ROLLON Linear Evolution, « Guidages linéaire sur rails », Mono Rail.
- [Catal 5] SKF, « Roulement », Mars 2014.

Annexe..... 113-125
Page

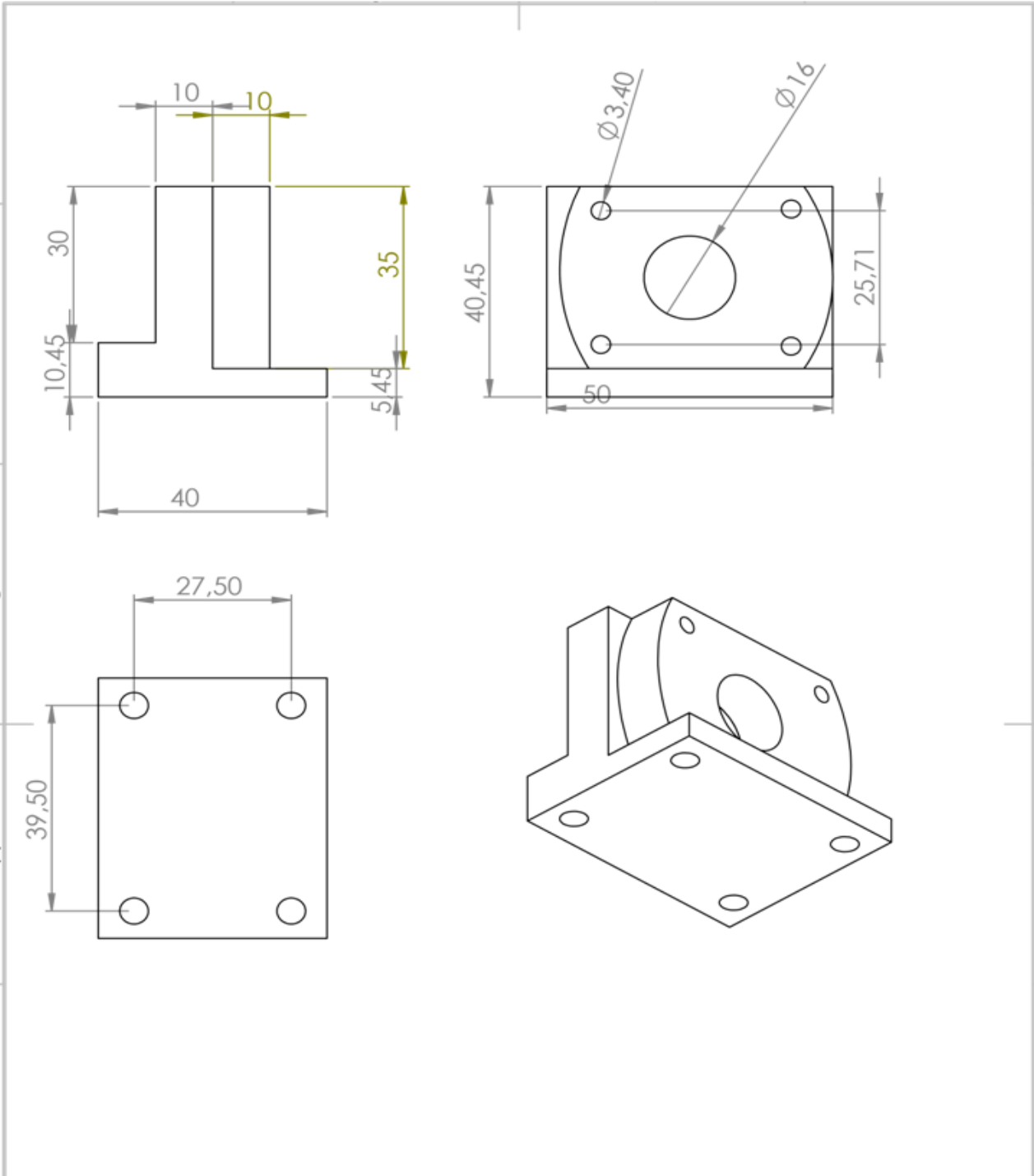


Annexe

1- Mise en plan des organes de la machine



Annexe



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

ECHELLE 1:1

Nom

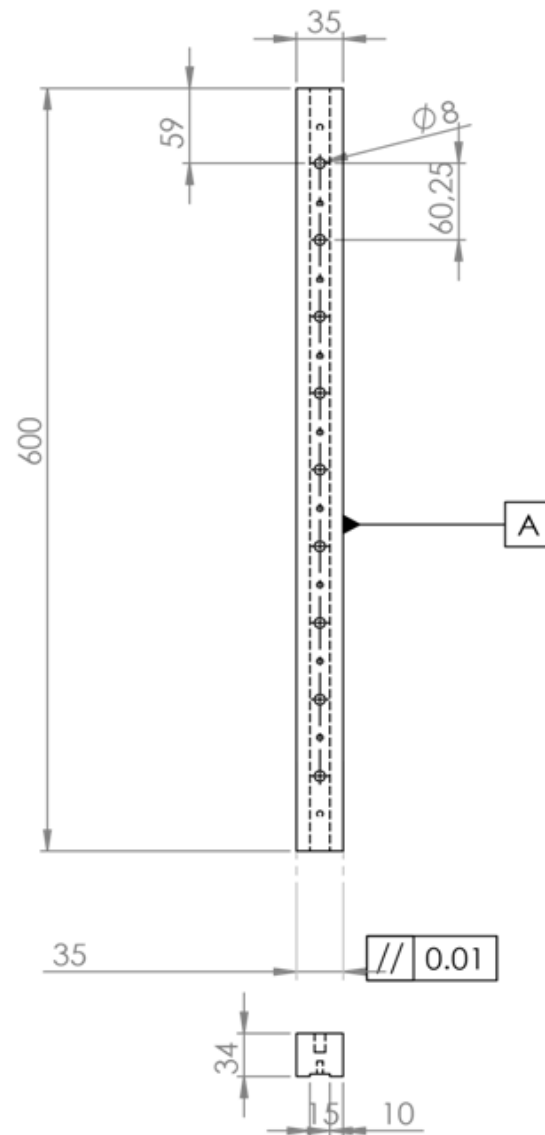
MAHDJOUBI

Matériaux
acier trempé à cœur
(100 Cr6)

ECROU DE LA VIS A BILLES

Génie
Mécanique

Annexe



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

Echelle 1:5

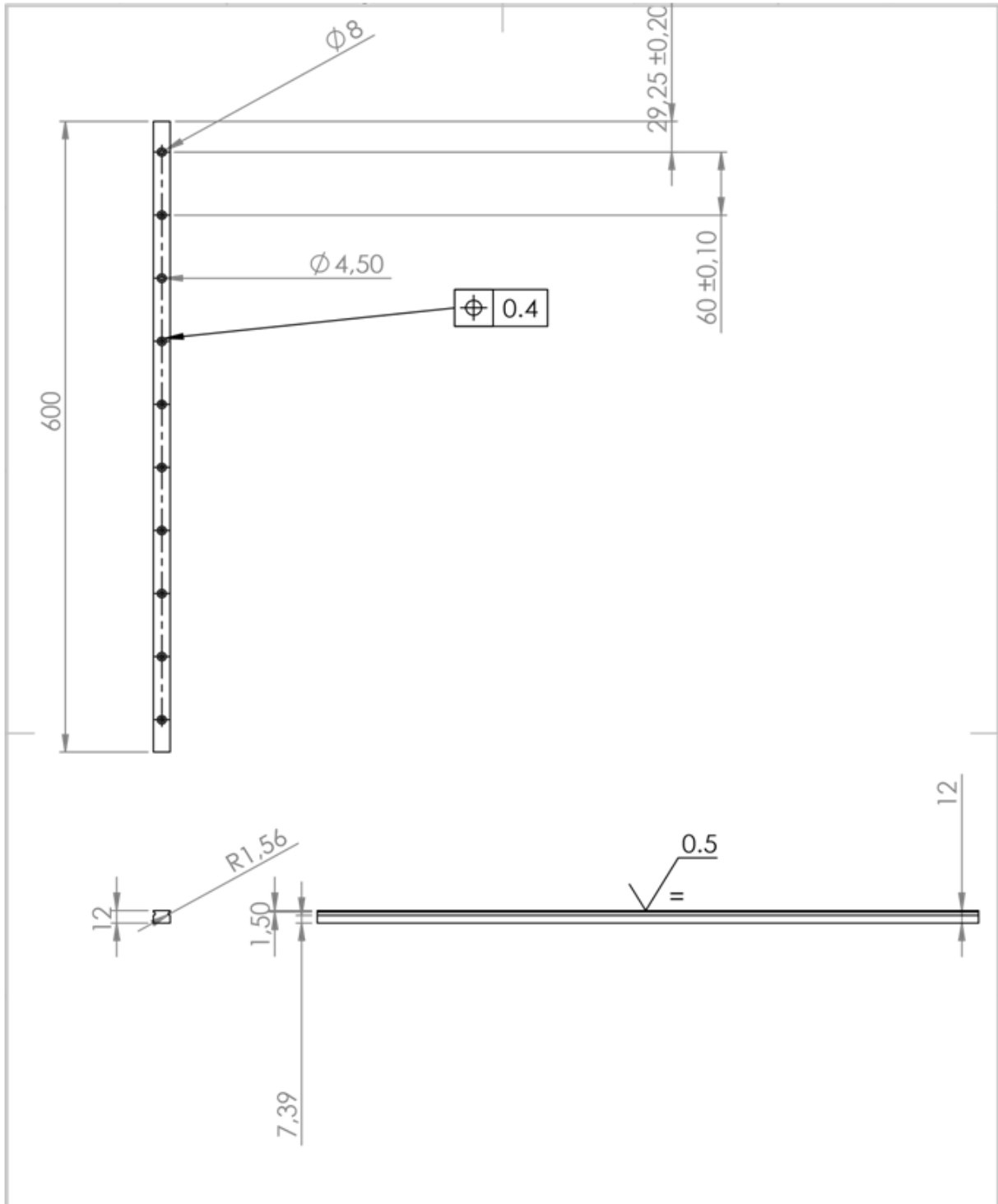
Nom
MAHDJOUBI

Génie
Mécanique

Support de Rail

Prénom
Abdelfettah

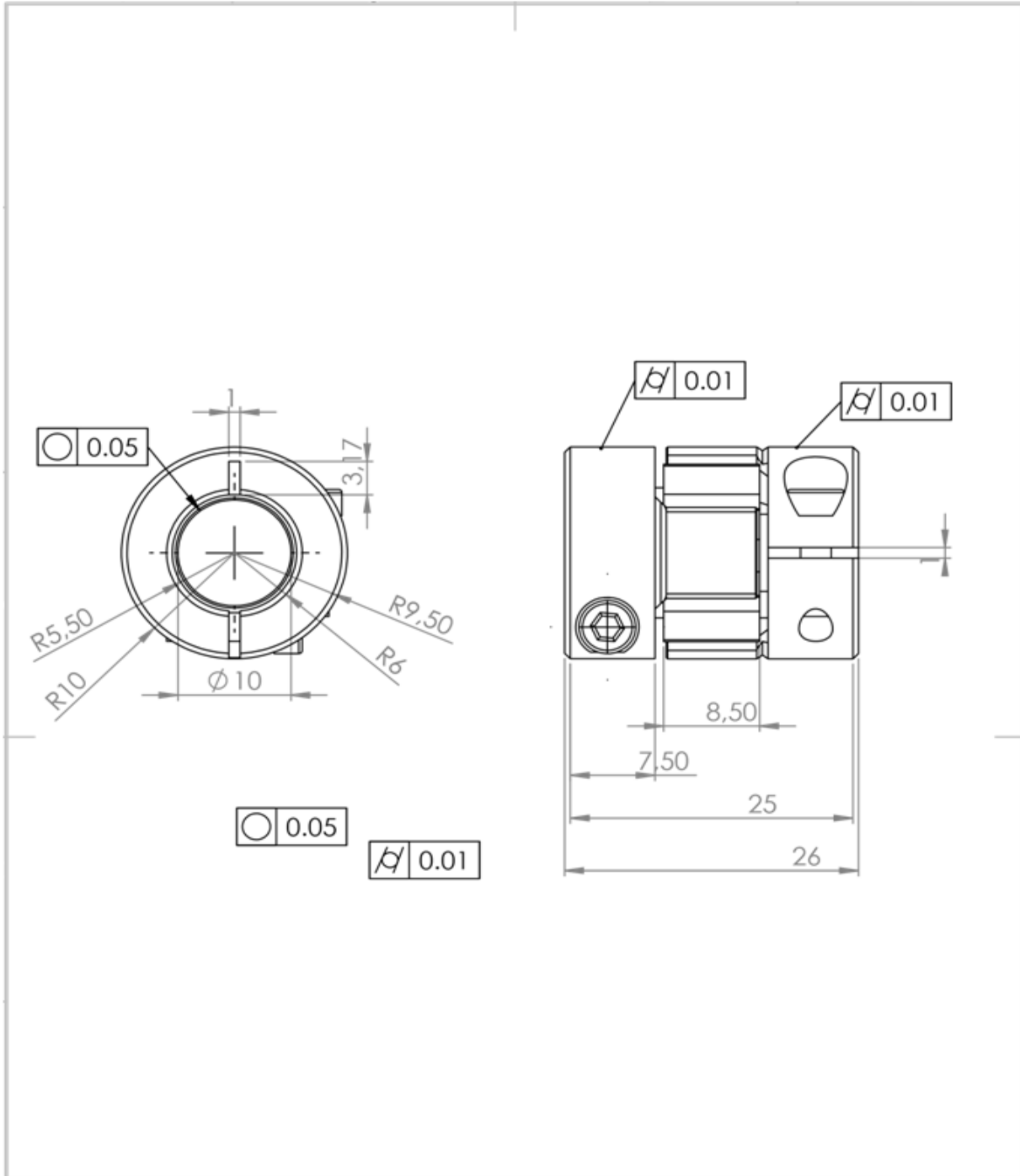
Annexe



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

ECHELLE:1:5	Rail	Nom MAHDJOUBI
Matériaux acier inoxydable martensitique		Génie mécanique
	MASSE:	FEUILLE 1 SUR 1

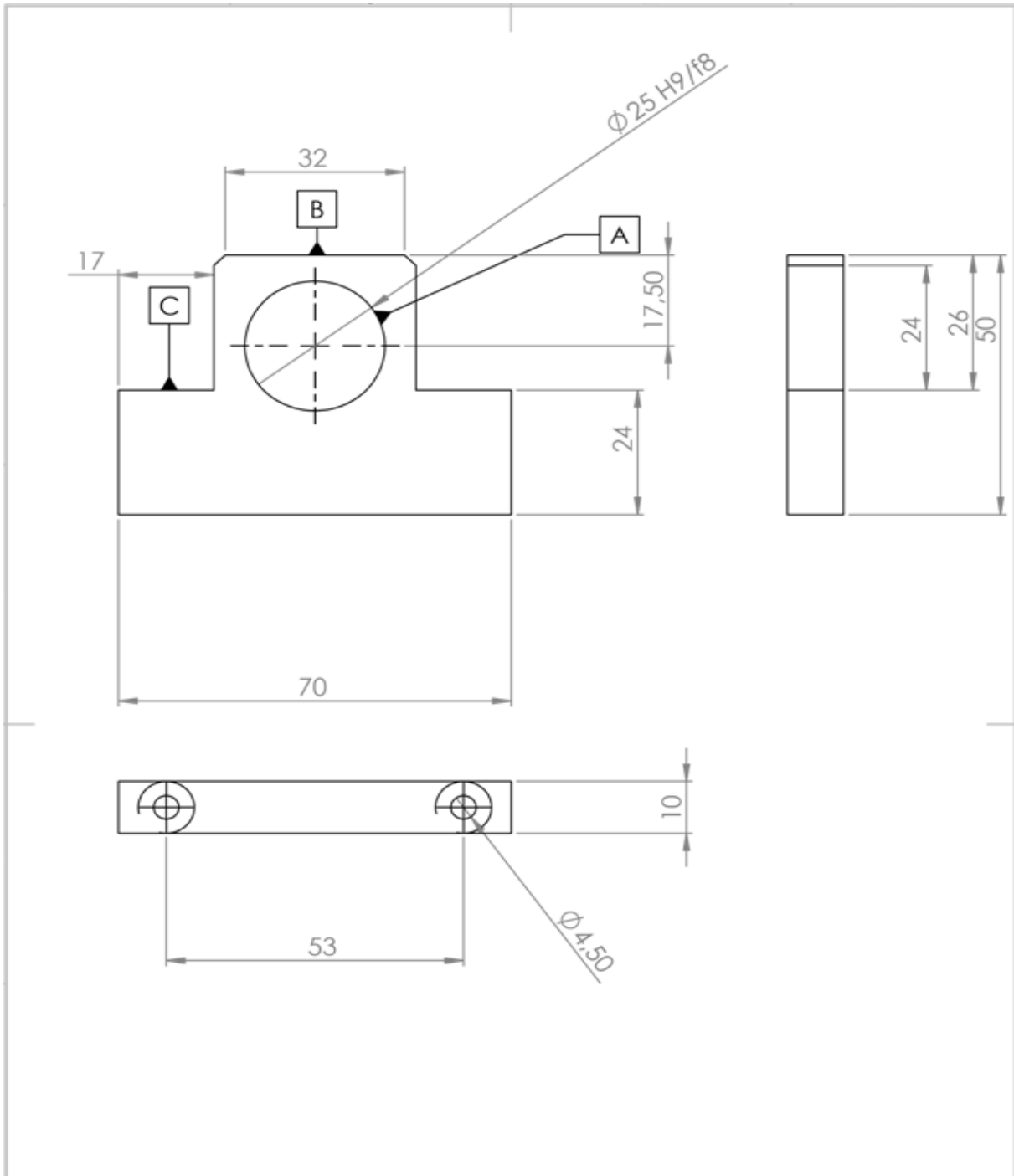
Annexe



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

Echelle 2:1	Accouplement	Nom MAHDJOUBI
Génie Mécanique		Prénom Abdelfettah

Annexe



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

ECHELLE 1:1

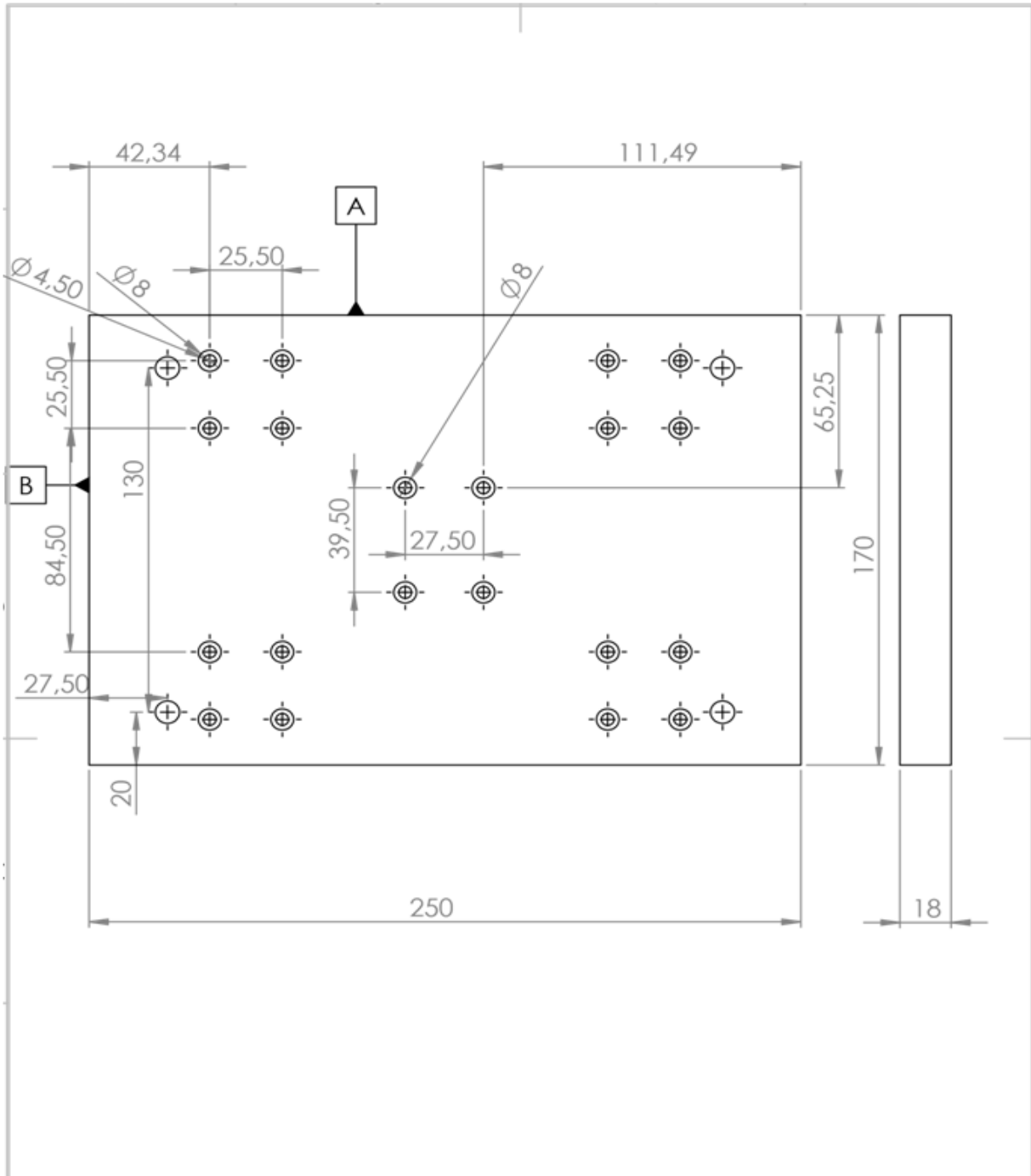
**Nom
MAHDJOUBI**

**Matériaux
Acier dur**

Palier

**Génie
Mécanique**

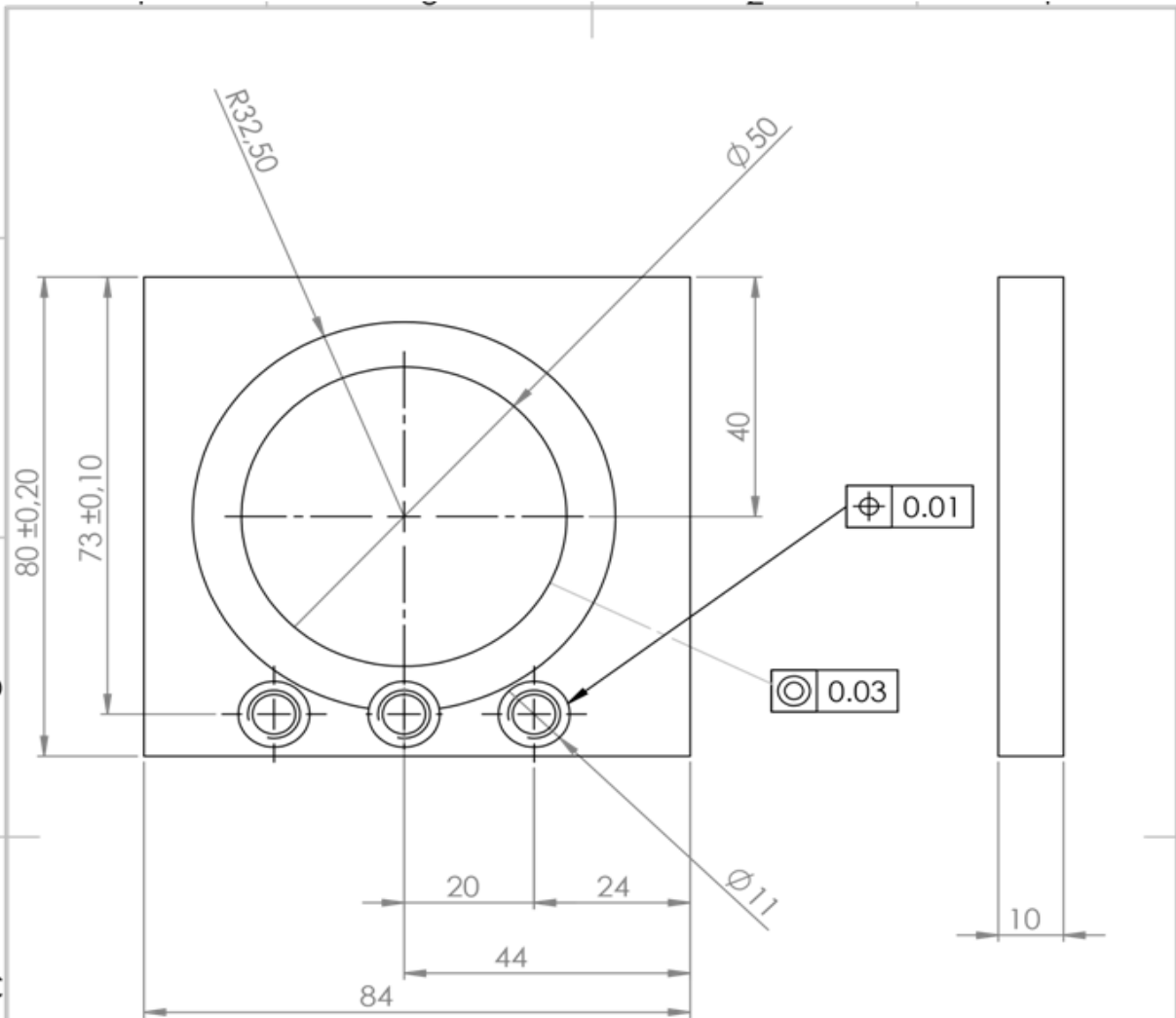
Annexe



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

ECHELLE 1:2	TABLE	Nom MAHDJOUBI
Matériaux Acier dur		Génie mécanique

Annexe



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

Echelle 1:1

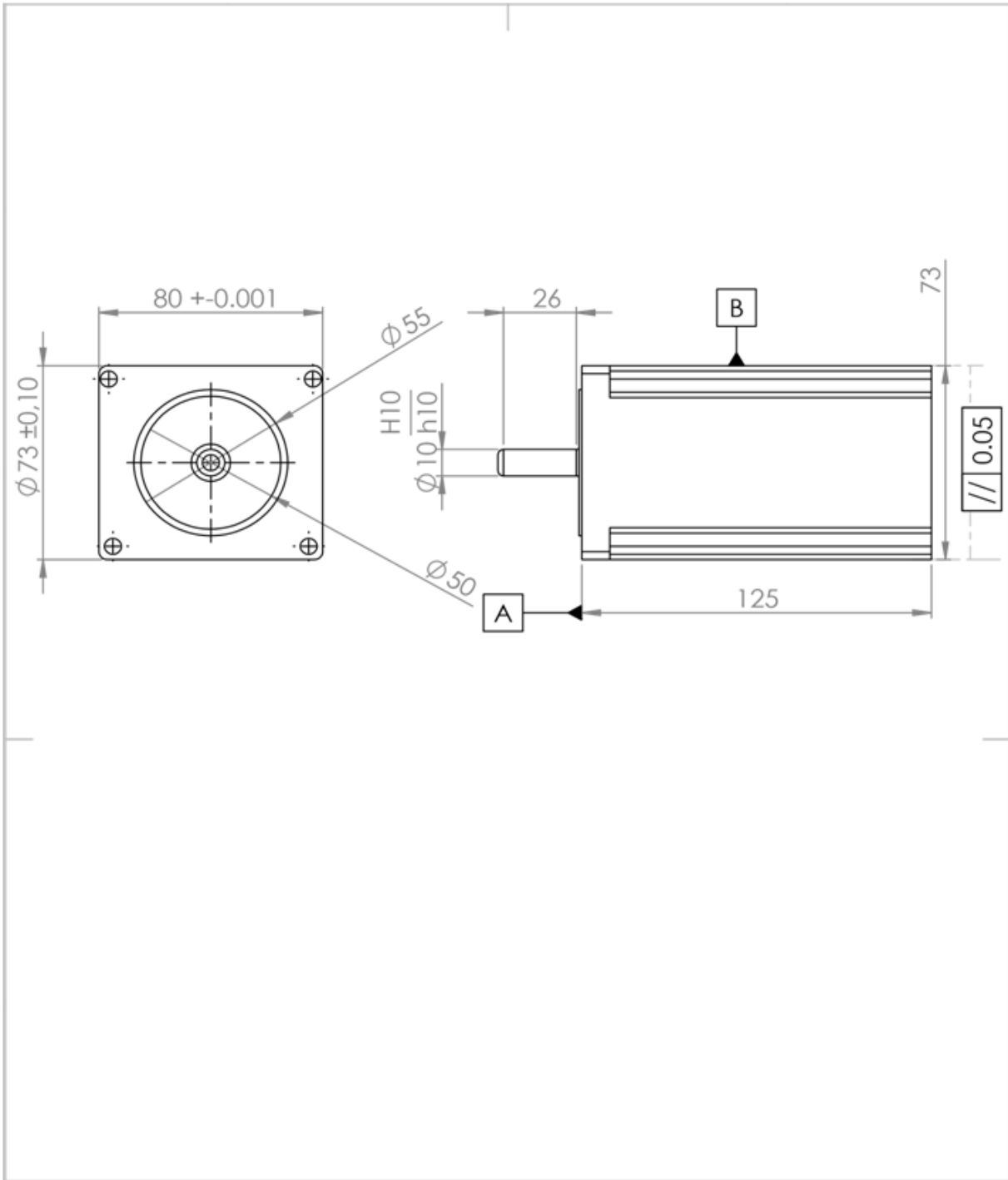
SUPPORT MOTEUR

Nom
MAHDJOUBI

Génie
mécanique

Prénom
Abdelfettah

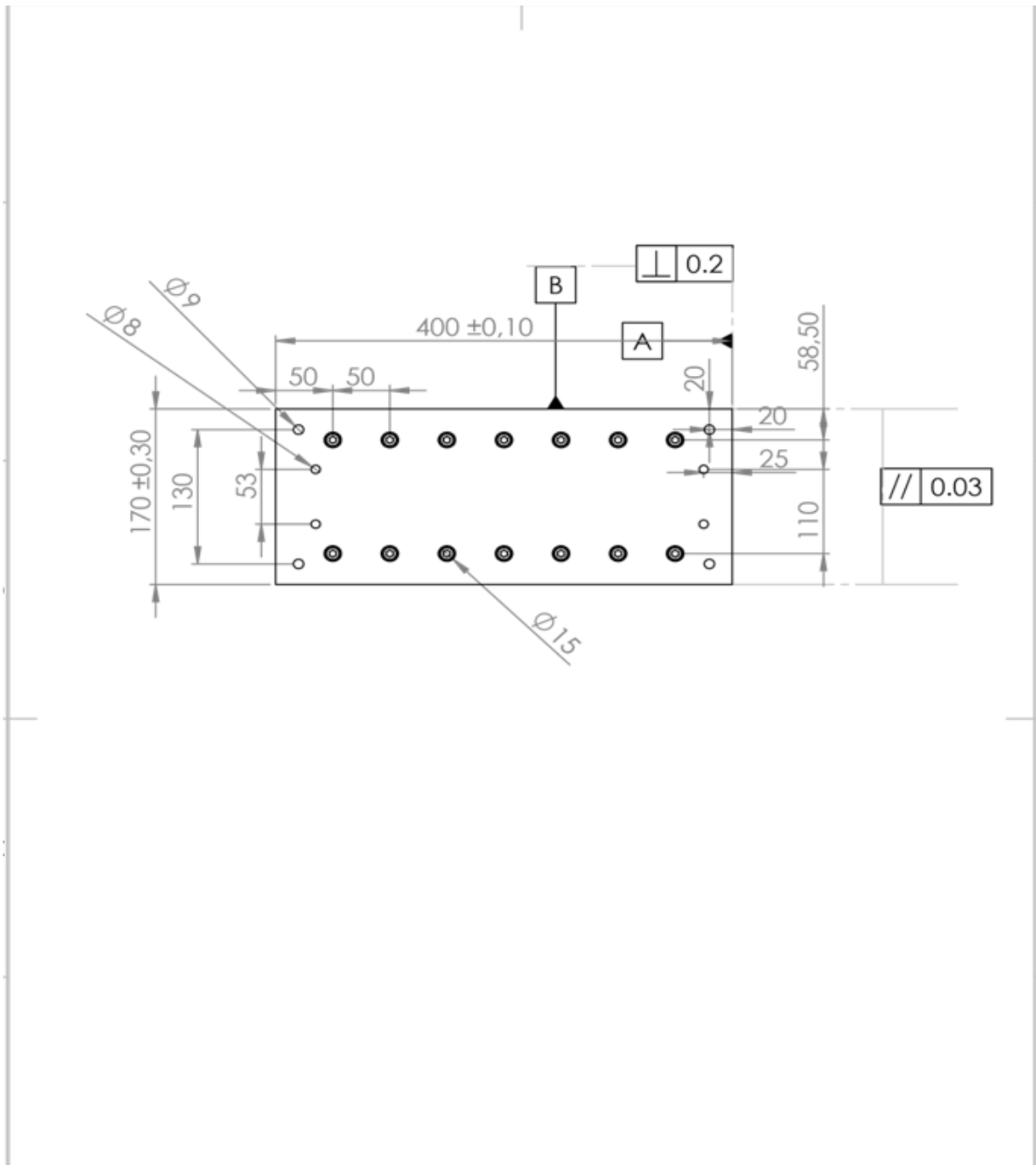
Annexe



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

Echelle 1:2	Moteur pas à pas	Nom MAHDJOUBI
Génie Mécanique		Prénom Abdelfettah

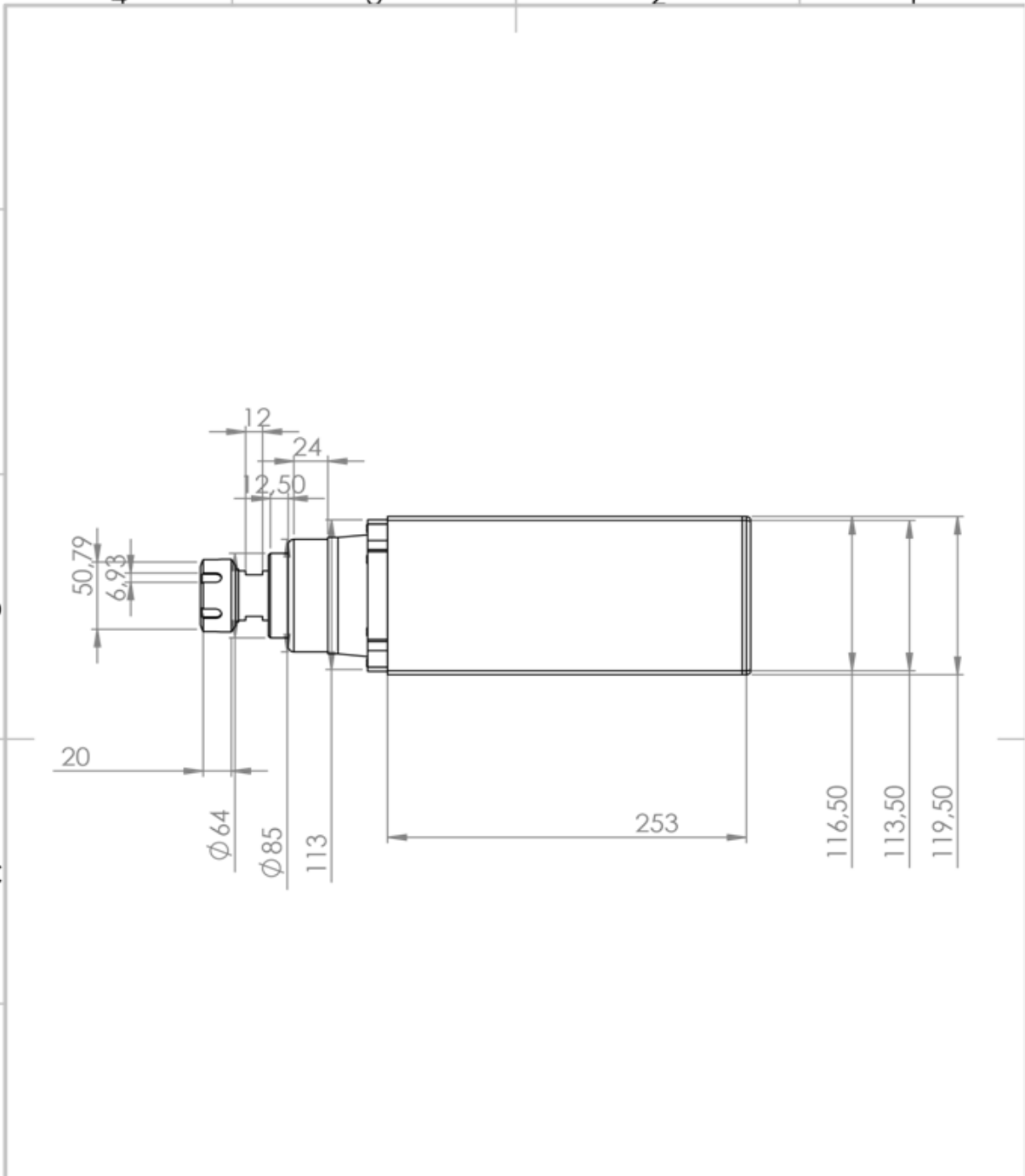
Annexe



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

Echelle 1:5	TABLE	Nom MAHDJOUBI
Génie Mécanique		Prénom Abdelfettah

Annexe



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

Echelle 1:2	Broche	Nom MAHDJOUBI
Génie Mécanique		Prénom Abdelfettah

2- Exemple pratique

Gcode

G54

T6 D6

M06

G01 G90 F10 S300 M3

G00 X0 Y0 Z-105

G00 X-60 Y0

G01 Z-115

G01 Y30

G01 X-50 Y40

G01 X50

G01 X60 Y30

G01 Y-30

G01 X50 Y-40

G01 X-50

G01 X-60 Y-30

G01 Y20

G00 Z-20

Annexe

3- La machine et l'armoire de commande

